



UNIVERSIDAD DE
MANIZALES®

**Diseño de una matriz multicriterio con variables espaciales para evaluar
SUDS en la gestión del riesgo de inundación en Bucaramanga.**

Gustavo Adolfo Carrillo Peña

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información
Geográfica

Asesor: Jiber Antonio Quintero Salazar, Magíster (MSc) en Planificación Urbana y Regional

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual
Manizales, Caldas, Colombia
2025

Cita	(Carrillo Peña, 2025)
Referencia	Carrillo Peña, G. A. (2025). <i>Diseño de una matriz multicriterio con variables espaciales para evaluar SUDS en la gestión del riesgo de inundación en Bucaramanga</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual, III

Centro de Investigaciones en Medio Ambiente y Desarrollo

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como [ChatGPT, Turnitin, Copilot, Gemini, entre otras], de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

Repositorio Institucional: <http://ridum.umanizales.edu.co/>

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

Revistas: <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

Fondo Editorial: <https://editorialum.umanizales.edu.co/>

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Dedico el desarrollo de este trabajo a Dios, quien con su sabiduría infinita me ha permitido avanzar en mi crecimiento profesional y personal, también a mi familia que me ha apoyado en mis decisiones en la búsqueda de ampliar mis conocimientos.

Agradecimientos

Primeramente, a Dios altísimo por brindarme una nueva oportunidad para seguir creciendo y expandiendo mis conocimientos.

A mi familia, por su apoyo incondicional en la búsqueda del alcance de mis metas.

A mi director de proyecto, el Ing Jiber Antonio, por su tiempo y orientación para culminar este proyecto.

Al Doctor Diego Alejandro Guzmán Arias, por su asesoría para el enfoque y desarrollo de nuevos conocimientos.

Tabla de contenido

1. Resumen.....	10
2. Abstract.....	11
3. Introducción.....	12
4. Planteamiento del problema.....	14
4.1. Antecedentes.....	15
5. Justificación.....	19
6. Objetivos.....	20
6.1. Objetivo general.....	20
6.2. Objetivos específicos.....	20
7. Hipótesis.....	21
8. Marco teórico.....	22
8.1. Concepción de los SIG.....	22
8.2. Aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica en los Recursos Hídricos.....	27
8.3. Análisis fundamentales en la gestión de los recursos hídricos implementando SIG.....	28
8.3.1. Preparación de datos y modelo de superficie.....	29
8.3.2. Análisis espacial.....	30
8.3.3. Softwares SIG en los recursos hídricos.....	33
8.4. Sistemas urbanos de drenaje sostenible - SUDS.....	34
9. Sitio de Estudio.....	38
10. Metodología.....	39
10.1. Selección de parámetros espaciales asociados a los riesgos de inundaciones – OE1. 39	
10.1.1. Obtención del Modelo de Elevación Digital - MED.....	40
10.1.2. Obtención del índice topográfico de humedad - IHT.....	42

10.1.2.1.	Reclasificación capa índice de humedad topográfica.	44
10.1.3.	Obtención capa uso de suelos.....	45
10.1.3.1.	Reclasificación capa uso de suelos.....	50
10.1.4.	Obtención y reclasificación mapa de pendientes - porcentual.	52
10.1.5.	Creación de las Unidades de Respuesta hidrológica - HRU's.	53
10.1.5.1.	Creación de HRU's.	54
10.2.	Variable climática y demográfica - OE1.....	56
10.2.1.	Variable climática - Intensidad de lluvias.	56
10.2.1.1.	Cálculo de curvas IDF por el método simplificado.....	56
10.2.2.	Variable demográfica - Población.....	61
10.3.	Construcción de la matriz multicriterio de pesos lineales para selección de sistemas SUDS. 63	
10.3.1.	Asignación de grados de importancia por niveles para las variables que componen las HRU – Pesos ponderados OE2 (parcial).	63
10.3.1.1.	Grado de importancia - Nivel 1, por clases en cada variable.	64
10.3.1.2.	Grado de importancia - Nivel 2, global.....	66
10.3.2.	Procedimiento para la construcción de la matriz de pesos lineales - OE3 (parcial). 67	
11.	Resultados.	71
11.1.	Unidades de Respuesta Hidrológica - HRU's.	71
11.2.	Clasificación de categorías de importancia para la construcción de matriz de pesos lineales. 72	
11.3.	Normalización de Uso de suelos, Pendiente e IHT, para las HRU's representativas de cada categoría – Pesos ponderados OE2.	76
11.4.	Evaluación entre HRU's con variable climática y demográfica.	77
11.4.1.	HRU - intensidad.....	77
11.4.2.	HRU - Población.	80

11.4.2.1. Relación de cobertura entre el área poblacional y las categorías de importancia.....	83
11.4.3. Sistemas SUDS recomendados por categorías de importancia - matriz multicriterio de combinación lineal de pesos - OE3.....	84
12. Discusión.....	87
13. Conclusiones	90
14. Recomendaciones.....	92
15. Referencias	94
16. ANEXOS.....	101

Lista de tablas

Tabla 1 Reclasificación - IHT.	44
Tabla 2 Reclasificación de Usos de suelos.....	51
Tabla 3 Clasificación de pendientes.	53
Tabla 4 Clases por variables para la formación de las HRU.....	55
Tabla 5 Parámetros ajustes de regresión.	57
Tabla 6 Ubicación de estaciones.	58
Tabla 7 Intensidad estaciones (mm/h).....	60
Tabla 8 Categorías densidad poblacional.....	62
Tabla 9 Clasificación importancia uso de suelos.	64
Tabla 10 Clasificación importancia pendientes.....	65
Tabla 11 Clasificación importancia índice de humedad topográfica.	66
Tabla 12 Grados de importancia método Saaty.....	66
Tabla 13 Matriz de Saaty.....	67
Tabla 14 Categorías de importancia para clasificación de HRU.....	73
Tabla 15 Listado de HRU's con grados de importancia – Pesos Ponderados.....	74
Tabla 16 Normalización de variables de las HRU Para los pesos ponderados.	76
Tabla 17 Intensidades de lluvia a nivel de HRU's.	78
Tabla 18 Normalización de intensidades por categoría de importancia.....	79
Tabla 19 Población total calculada por categorías a nivel de HRU's.	81
Tabla 20 Relación entre categorías de importancia y población.....	83
Tabla 21 Áreas en Ha por categorías de densidad poblacional.....	83
Tabla 22 Resumen de alternativas de sistemas SUDS en las categorías de importancia.	86
Tabla 23 Relación sistemas SUDS y variables HRU.	103

Lista de ilustraciones

Figura 1	Plataformas de funcionamiento ArcGis.....	26
Figura 2	Algoritmo del D8.....	29
Figura 3	Algoritmo de distribución para dirección de flujo múltiple.	32
Figura 4	Ubicación del Municipio de Bucaramanga.....	38
Figura 5	Puntos extraídos de google earth.	40
Figura 6	Listado de puntos con alturas - procesamiento.	41
Figura 7	Conjunto de puntos y MED.	42
Figura 8	Mapa Índice de humedad topográfica - IHT.....	43
Figura 9	Rangos de reclasificación - IHT.	44
Figura 10	Mapa IHT (Reclasificado).	45
Figura 11	Búsqueda de información base de datos.....	46
Figura 12	Imagen satelital portal SAS Planet	47
Figura 13	Edición en AutoCAD.....	48
Figura 14	Capas de uso de suelo en dwg.	49
Figura 15	Capas de uso de suelo.	50
Figura 16	Capa uso de suelos reclasificada en formato ráster.	52
Figura 17	Reclasificación de pendientes.....	53
Figura 18	Recorte de ráster.	54
Figura 19	Creación de HRU's con la calculadora ráster.....	55
Figura 20	Regiones en Colombia para definición de parámetros a,b,c y d.....	57
Figura 21	Ubicación de estaciones de precipitación.	59
Figura 22	Interpolación de intensidades.	60
Figura 23	Mapa densidad poblacional - categorizado.....	63
Figura 24	Mapa HRU - Combinaciones.....	71

Figura 25 Entorno Rstudio.....	72
Figura 26 Distribución espacial del nivel de importancia para los SUDS.....	76
Figura 27 Distribución espacial de intensidades en las HRU's.	77
Figura 28 Distribución espacial de polígonos de HRU's por categorías de densidad poblacional.	80
Figura 29 Curvas IDF - estaciones.....	101

1. Resumen

Las modificaciones ocasionadas por el desarrollo de los entornos urbanos han generado afectaciones directas en la gestión de las aguas lluvias, motivadas por cambios en las coberturas de los suelos y el aumento de zonas impermeables, lo que produce mayores volúmenes de escorrentía y evidencia las deficiencias de los sistemas de drenaje convencionales. En respuesta a esta problemática, en diversas zonas urbanas de distintas ciudades se han implementado mecanismos orientados a optimizar la gestión de las aguas lluvias mediante el uso de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). En este estudio se propone una metodología para implementar dichos sistemas bajo la concepción de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). El punto de articulación entre ambos enfoques es la definición de unidades de respuesta hidrológica (HRU), conformadas a partir del uso del suelo, la pendiente y el índice de humedad topográfica.

Con base en estos parámetros, fundamentales para el análisis hidrológico se realizó un análisis espacial que permitió clasificar la zona de estudio en cinco (5) categorías de importancia. Asimismo, se incorporaron intensidades de lluvias máximas obtenidas de curvas IDF para diferentes periodos de retorno. Adicionalmente, se diseñó una matriz multicriterio como herramienta de gestión del riesgo, definiendo la aplicación de los sistemas SUDS de acuerdo con el periodo de retorno y la categoría de importancia. Los resultados proponen soluciones como pavimentos permeables, filtros y cunetas verdes para periodos de retorno menores; tanques de infiltración y humedales para periodos intermedios; y cuencas secas con zonas inundables para periodos de retorno altos.

Palabras clave: Uso de suelos, Pendiente, Índice de humedad, HRU, SIG, SUDS, Intensidad.

2. Abstract

The modifications caused by the development of urban environments have directly affected stormwater management, driven by changes in land cover and the increase in impermeable areas. This situation generates greater runoff volumes and highlights the deficiencies of conventional drainage systems. In response to this issue, several urban areas in different cities have implemented mechanisms aimed at optimizing stormwater management through the use of Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS). This study proposes a methodology for implementing these systems under the framework of Geographic Information Systems (GIS). The intersection between both approaches lies in the definition of Hydrological Response Units (HRU), which are determined by land use, slope, and topographic wetness index.

Based on these parameters—fundamental to hydrological analysis spatial analysis was conducted to classify the study area into five (5) categories of importance. In addition, maximum rainfall intensities were incorporated from Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves for different return periods. Furthermore, a multicriteria matrix was developed as a risk management tool, establishing the application of SUDS according to the return period and the corresponding category of importance. The results propose solutions such as permeable pavements, filters, and green swales for shorter return periods; infiltration tanks and wetlands for intermediate periods; and dry basins with floodable areas for longer return periods.

Keywords: Land use, Slope, Wetness index, HRU, GIS, SUDS, Intensity.

3. Introducción

Las inundaciones como fenómeno han sido motivadas por diversas situaciones entre las más importantes se encuentra el accionar climático y las afectaciones al interior de las cuencas hidrográficas, estos escenarios han llevado a que se generen distintos tipos de daños tanto materiales, económicos, ambientales y pérdidas de vidas humanas. Han sido ocasionados a lo largo de la historia en diferentes magnitudes sobre varias zonas del planeta, por lo tanto, es la razón para que se adelanten diversos tipos de investigaciones y estudios en donde se evalúen distintos enfoques destinados a comprender las dinámicas en las inundaciones y así gestionar planes de prevención mediante la implementación de sistemas basados en la protección de poblaciones y áreas de interés. Ahora el comportamiento de las inundaciones en zonas rurales y urbanas presentan dinámicas distintas, ya que el área urbana ha sido modificada tanto en su superficie como la cobertura, todo esto bajo la búsqueda del progreso para la mejora en la calidad de vida enmarcada dentro de los planes de desarrollo de las ciudades (Sedano-Cruz et al., 2013).

La situación urbana ha impulsado fuertemente los cambios de cobertura de suelos especialmente la modificación del suelo natural por rígido, siendo este cambio una afectación notable para el comportamiento hidrológico, ya que se genera reducción en los procesos de infiltración resultando en altos volúmenes de escorrentía directa y sumado a las deficiencias en cuanto a los sistemas convencionales de drenaje, se hace necesario implementar mecanismos para que permitan gestionar estas deficiencias (Joshi et al., 2021). Actualmente, se han ido impulsando alrededor del mundo la aplicación en algunas ciudades de sistemas urbanos de drenaje sostenible denominados SUDS, estas alternativas tienen como propósito mejorar la gestión de las aguas lluvias en donde busca implementar el drenaje natural (Ferrans et al., 2022).

Por lo tanto, este proyecto pretende elaborar y aplicar una metodología que permita generar una matriz multicriterio basada en variables espaciales de un área urbana, para la selección previa de sistemas SUDS como mecanismo de control de inundaciones bajo el contexto de las herramientas de los sistemas de información geográfica - SIG, en donde se discretice la zona de estudio mediante unidades de respuesta hidrológica - HRU. Este documento está conformado por varias secciones que va desde el planteamiento del problema, antecedentes, justificación, objetivos,

hipótesis, marco teórico, ubicación del área de estudio, metodología, resultados, análisis de resultados, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

4. Planteamiento del problema

Los fenómenos de inundaciones han provocado innumerables afectaciones a lo largo de la historia ocasionando diversos tipos de desastres sobre poblaciones adyacentes a las fuentes hídricas que son zonas potencialmente inundables en donde se forman alteraciones en los ecosistemas debido a los daños ambientales generados (Masumoto et al., 2006), entre las situaciones que propician modificaciones dentro de la dinámica climática de las cuencas se debe al “Fenómeno de La Niña” que ocurre en un periodo de tiempo al año conllevando directamente en aumentos de las precipitaciones que se reflejan en los altos niveles del flujo de agua, tanto de las fuentes hídricas como de la escorrentía lateral (Bernet et al., 2019).

Otro de los factores relevantes que motivan las altas precipitaciones ha sido relacionado con el cambio climático debido al calentamiento global que a lo largo de los últimos años ha ido intensificándose teniendo como consecuencias largas temporadas de sequía y lluvias como respuesta a los extremos del ciclo hidrológico, esta situación hace que la cantidad de agua de precipitación sea alta y en un corto periodo de tiempo es traducida en caudales excesivos en donde algunos canales naturales de las fuentes hídricas no tienen la capacidad para transitarlos dando como resultados desbordamientos sobre las zona laterales secas (Yin et al., 2023), esta situación descrita dentro del contexto urbano implica riesgos y amenazas para la seguridad y funcionamiento de la infraestructura importante de una ciudad (Ossa-Moreno et al., 2017).

Adicionalmente, hay otro tipo de situaciones que motivan la generación de inundaciones dentro de las cuencas y es debido a las modificaciones de las coberturas del suelo, ya que por acciones antrópicas propias del ser humano y en su proceso de desarrollo ha optado por impermeabilizar espacios para vías, edificaciones, etc, junto con zonas destinadas a las actividades agropecuarias, todos estos cambios impactan negativamente en las capacidades de infiltración del suelo causando que alto porcentaje de la lluvia que cae se transforme en escorrentía directa (Sedano-Cruz et al., 2013), por lo tanto, la combinación del factor climático junto con las alteraciones en la superficie del suelo intensifica el proceso hidrológico del agua haciendo que el fenómeno de las inundaciones sea más grave (Talbot et al., 2018), ahora, sino se cuenta con la preparación adecuada

por parte de entidades encargadas de la gestión del riesgo pueden ser las afectaciones muy altas tanto a nivel humano como material (BID, 2015).

En el contexto mundial las afectaciones ocasionadas por las inundaciones han sido muy recurrentes con diversos grados de desastres, en donde la gran parte de estos casos son motivados por situaciones hidrológicas y climatológicas (Arreguín Cortés et al., 2016), según información, del sitio *Prevention Web*, durante el año 2022 varios países fueron afectados por inundaciones como es el caso de Pakistán en donde hubo pérdidas de más de 1500 vidas humanas y daños materiales, esta situación también se ha replicado a nivel mundial tanto en África, Emiratos Árabes Unidos, Irán, Arabia Saudita, Qatar, Omán, Yemen y otros.

En cuanto a Colombia su ubicación geográfica le representa una posición estratégica como uno de los países con mejor oferta hídrica del planeta (García et al., 1998), esta circunstancia en conjunto con el cambio climático y modificaciones de coberturas de suelo en algunas zonas del país genera altas probabilidades al fenómeno de inundación, en donde los registros más destacados de estos sucesos se centran en la ola invernal originada en los años 2010 y 2011.

¿La matriz multicriterio de pesos lineales puede ayudar en la selección e implementación de sistemas SUDS zonas urbanas a partir del análisis espacial?

4.1. Antecedentes.

El manejo de las aguas de escorrentía producto de las precipitaciones ha sido una de las situaciones que se ha tratado a lo largo de la historia en diversas partes del planeta, debido a que esto es controlado por las condiciones climáticas y meteorológicas que en ocasiones tienden a presentarse con mayor intensidad produciendo inundaciones por aumentos en los volúmenes de agua debido a las respuestas de las cuencas sobre los cuerpos hídricos. Dentro del contexto urbano las condiciones del entorno hace que la respuesta hidrológica de la cuenca opere de manera distinta a una cuenca de tipo rural ya que el espacio urbano ha sido especialmente afectado en cuanto a modificaciones de las coberturas y cambios en aspectos geomorfológicos de la superficie para ser adaptados a las necesidades de las infraestructuras requeridas en el desarrollo del hábitat urbano,

pero todo esto ha generado consecuencias por desequilibrios en el entorno natural especialmente ante los fenómenos climáticos de las lluvias que producen altos volúmenes de agua sobre zonas que no cuentan con la capacidad suficiente para el manejo adecuado, ante esto la mayoría de ciudades a nivel global presentan sistemas de drenaje o alcantarillados de tipo combinados que son uno de los principales factores que promueven la contaminación de las aguas superficiales (Copetti et al., 2019). Para hacer frente ante esta situación comúnmente se enfoca la atención en aumentar el dimensionamiento del sistema de drenaje existentes mediante procesos de actualizaciones de las redes (Tavakol-Davani et al., 2016), pero este tipo de decisiones tienden a elevar los costos en la solución del problema, por lo tanto, esta situación ha sido foco de atención importante por parte de investigadores donde la idea de tomar el control sobre los caudales máximos producto de las lluvias mediante la infiltración del flujo ocasionando aumento del tiempo de retención (Joshi et al., 2021). Actualmente, se han desarrollado diferentes alternativas de sistemas SUDS, como; pavimentos permeables, alcorques inundables, cunetas verdes, jardines de lluvias, tanques de almacenamiento, humedales, zonas inundables, etc.

La aplicación de los sistemas SUDS han ido teniendo acogida en diferentes partes del planeta donde se han obtenido resultados satisfactorios en lograr reducir las inundaciones, a continuación unos casos de éxito.

- En un distrito de Shenzhen, China, la implementación de alternativas como pavimentos permeables y los techos verdes, lograron reducir las inundaciones urbanas bajo lluvias de diferentes intensidades (Qin et al., 2013).
- La implementación de cuatro alternativas de sistemas, celdas de biorretención, pavimentos permeables, barriles de lluvia y techos verdes en el municipio de Fehraltorf en Zurich, Suiza, permitió variar la atenuación del volumen de agua transportado en la red de drenaje de sistema alcantarillado combinado entre el 50% al 99% (Joshi et al., 2021).
- La importancia de los procesos de toma de decisiones por parte de los administradores de recursos hídricos que no cuentan con la experticia en el aspecto técnico de los SUDS y, por lo tanto, es fundamental eliminar los sesgos inherentes a los juicios de las decisiones (Ferrans et al., 2022).

- Aplicación de una metodología para la implementación de los sistemas SUDS mediante un esquema multicriterio en la identificación de áreas estratégicas en Gijón - España, combinando sistemas de información geográfica y procesos analítico jerárquico, en donde se identificaron nueve criterios relacionados con los pilares de diseño y su implementación beneficiaría óptimamente en áreas urbanas consolidadas (Suárez-Inclán et al., 2022).
- La aplicación de los sistemas SUDS para evaluar su potencial en una cuenca del sur de Italia, donde se verificó mediante simulaciones con un modelo hidráulico antes y después de su implementación sobre zonas públicas del área urbana, arrojando un buen desempeño con los pavimentos permeables y techos verdes, pero podría alcanzar mayor impacto donde se involucren a propietarios de terrenos privados y así lograr modernizar el entorno urbano con una gestión más eficiente el tratamiento de los recursos hídricos (Pappalardo et al., 2017).

A nivel nacional la implementación de los sistemas SUDS no ha sido muy activa, pero ya se han dado pasos para su aplicabilidad principalmente en la ciudad de Bogotá, donde la investigación y estudios sobre estos sistemas es adelantada que incluso por parte de la secretaria distrital de ambiente se cuenta con documentos técnicos para los sistemas SUDS. Adicionalmente, el ministerio de vivienda a través del departamento nacional de planeación como entidad pública de orden nacional ha elaborado la “Guía metodológica para la formulación e implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible”. Entre las entidades que ha impulsado la implementación de estos sistemas está el Banco Interamericano de Desarrollo - BID de orden internacional que ha destinado para Colombia inversiones en el ámbito de drenaje mediante el proyecto denominado “Sistemas innovadores de drenaje pluvial en Colombia”, en donde se busca mejorar la gestión integral del drenaje pluvial basado en el cambio climático, planificación urbana e infraestructura (gris, verde y azul) (BID, 2023). Estudios realizados en materia de sistema SUDS.

- En la ciudad de Bogotá en la localidad de Fontibón se investigó la implementación de pozos y zanjas de infiltración para controlar la escorrentía en donde se evaluaron las condiciones hidrológicas de la zona de estudio junto con un análisis hidráulico EPA-SWMM, este estudio arrojó reducción en los caudales entre 84 y 76 l/s, permitiendo disminuir el caudal

aportado al sistema convencional reflejado en menores diámetros y pendientes de la red con la finalidad de garantizar las condiciones hidráulicas (Cubides & Santos, 2018).

En la ciudad de Bucaramanga aún no se ha implementado Sistemas SUDS como medida para mejorar la gestión de sistemas de drenajes urbanos, teniendo en cuenta que la ciudad ha presenciado en muchas ocasiones por efectos de las lluvias torrenciales el colapso de las redes de alcantarillado que no cuentan con la suficiente capacidad de evacuar o transitar los flujos de manera adecuada, por lo tanto, las consecuencias son daños materiales en viviendas y vías de comunicación han impactado negativamente en la calidad de vida de la población (Trujillo, 2021), sobre este tema se han realizados estudios con la finalidad de analizar el impacto y propuestas de mitigación por los efectos de las inundaciones.

- La verificación del impacto de los programas de mitigación desarrollados por parte de la autoridad ambiental competente para la ciudad de Bucaramanga - CDMB, entre las diferentes medidas que han implementado es desarrollar obras que eviten el desbordamientos y fenómenos erosivos en los distintos cuerpos de agua que contiene la ciudad, estas medidas han logrado beneficiar a sectores de poblaciones que se ubican principalmente cerca de las rondas hídricas (Villar & Vega Serrano, 2014).
- Desarrollo de trabajos investigativos empleando herramientas SIG, que permitan la identificación de zonas de inundación en el área metropolitana de Bucaramanga, entre las zonas más afectadas se encuentra el costado occidental de la ciudad en donde se localizan asentamientos humanos junto con zonas industriales adyacentes al Río de Oro, que es el cuerpo de agua más grande del área metropolitana, este río ha presentado en varios momentos aumentos de la lámina de agua que genera desplazamiento del flujo a los costado que ocasionan desastres (Trujillo Ocampo, 2021).

5. Justificación.

Los comportamientos hidrológicos de las cuencas al interior han sido afectados tanto por el accionar del ser humano en la búsqueda de su desarrollo y bienestar mediante acciones antrópicas y en conjunto con las condiciones climáticas de calentamiento global que intensifican los fenómenos en la producción de agua que con llevan a desbordamientos, esta situación es de gran interés en estudios de investigación que se centran en comprender las dinámicas del ciclo hidrológico (Arreguín Cortés et al., 2016). Ahora, este contexto dentro del ámbito urbano donde las modificaciones del entorno natural son ampliamente notable para adaptarse a las condiciones y estilos de vida hace que se ejerza alta presión sobre los sistemas de drenaje de aguas lluvias tanto en la captación, transporte y descargar, por lo tanto, es necesario tener en cuenta las capacidades para una gestión eficiente de los caudales ya que al fallar este sistema puede generar interrupciones de tráfico, afectación a la calidad del agua, daños ambientales, pérdidas económicas, afectaciones de salud, etc (Joshi et al., 2021).

El enfoque de este proyecto se basa en realizar análisis espacial de la zona estudiada mediante diferentes variables que influyen en los procesos de hidrológicos dentro de una cuenca urbana involucrando el componente topográfico, el uso de la tierra y variable climática, en donde se hace necesario la aplicación de herramientas de clasificaciones espaciales (Joshi et al., 2021), que permita denotar las diferentes zonas de riesgo mediante sistemas SIG determinando la susceptibilidad a inundaciones (Suárez-Inclán et al., 2022) en donde se requieren de soluciones para el mejoramiento y mitigación de la problemática (Trujillo, 2021).

Hace algunos años se ha venido implementando nuevas medidas en zonas urbanas para contener estas afectaciones a partir de tecnologías basadas en replicar las condiciones naturales en los procesos de infiltración de las aguas lluvias, bajo mecanismos probados con gran efectividad en algunas zonas a nivel mundial que difieren de los métodos convencionales de canalización (Ossa-Moreno et al., 2017), estos métodos son denominados SUDS - sistema urbano de drenaje sostenible, que buscan aumentar el tiempo de respuesta de la cuenca implementando técnicas especiales de infiltración del agua lluvia en las capas permeables del suelo (Joshi et al., 2021) en donde se atenúen los volúmenes de agua de las precipitaciones extremas (Ferrans et al., 2022).

6. Objetivos

6.1. Objetivo general

Diseñar una matriz multicriterio, que permita la evaluación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles (SUDS) a partir de variables espaciales extraídas mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), relacionadas con el riesgo de inundación en la zona urbana de Bucaramanga.

6.2. Objetivos específicos

- OE1: Identificar y seleccionar los parámetros espaciales y las variables climáticas clave asociados al riesgo de inundación, mediante la revisión bibliográfica y el análisis espacial con herramientas SIG.

- OE2: Determinar el peso relativo y la ponderación de los parámetros seleccionados, estableciendo categorías de importancia para la evaluación multicriterio.

- OE3: Desarrollar la estructura de la matriz multicriterio basada en el método de combinación lineal de pesos, integrando los parámetros espaciales y climáticos ponderados para la evaluación de los SUDS.

- OE4: Formular recomendaciones e instrucciones para la implementación de la matriz para el correcto funcionamiento y aplicabilidad.

Nota: Para especificar el cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos dentro del documento se agregará en el numeral correspondiente el indicativo - OEX.

7. Hipótesis.

La matriz multicriterio, que incorpora el análisis de variables espaciales mediante SIG, constituye una herramienta eficaz para la evaluación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en áreas urbanas, contribuyendo a la gestión del riesgo de inundación.

8. Marco teórico.

En este numeral se describen los conceptos y bases teóricas para el desarrollo del proyecto. La primera subsección describe una breve concepción de los SIG, La segunda subsección relaciona la importancia entre los sistemas de información geográfica - SIG y su aplicación en la gestión de los recursos hídricos. La tercera subsección describe análisis y herramientas SIG aplicadas a la gestión de los recursos hídricos. Por último, la cuarta subsección se da una descripción de los sistemas urbanos de drenaje sostenible - SUDS.

8.1. Concepción de los SIG.

A lo largo del desarrollo de los SIG se han escrito diferentes tipos de definiciones que tratan de explicar su funcionamiento y aplicabilidad, especialmente como un conjunto de hardware y software con datos y técnicas (Morad & Triviño Pérez, 2001), ofreciendo con capacidades para el almacenamiento junto a herramientas de edición, análisis de información georreferenciada, visualización y compartir resultados bajo consultas de las operaciones realizadas (Pérez Guerra et al., 2023). Este tipo de información espacial ha sido la base fundamental para la elaboración de cartografías, en donde los mapas creados digitalmente pueden ser modificados manualmente o de manera automática (BERRY, 1990).

Los procesos de innovación y crecimiento tecnológico han impactado significativamente en los sistemas de información geográfica - SIG, en donde las mejoras en las capacidades y desarrollo de nuevas herramientas permiten optimizar diferentes tipos de procesos, entre los que se encuentra; la descripción y representación del terreno georreferenciado en coordenadas espaciales, localización de asentamientos humanos, clasificación de usos de suelos, diseño de mapas de riesgo, planificación urbana, gestión de recursos hídricos, entre otras (Sosa-Pedroza & Martínez-Zúñiga, 2009). Lo anterior, confirma que los SIG han logrado superar obstáculos del pasado para el procesamiento de gran cantidad de datos gracias a las distintas operaciones destinadas a la obtención de mapas orientados a objetos (Chen, 1996) que ha conllevado a la transformación de los SIG en herramientas potentes y modernas para la toma de decisiones (Morad & Triviño Pérez, 2001).

Para los SIG haber evolucionado hasta el estado actual en que se encuentran han tenido una base fundamental sobre los conocimientos e ideas desarrolladas por cartógrafos y en conjunto con la necesidad humana en la posesión y tratamiento de datos geográficos, destinados a la localización y ubicación empleando el análisis espacial mediante técnicas sofisticadas (Jones, 2014). Adicionalmente, una de las bases fundamentales como pilar en el desarrollo y crecimiento de los SIG ha sido el diseño asistido por computador – CAD, en donde se experimentaron las primeras aplicaciones que luego fueron mejoradas mediante nuevas rutinas enfocadas en las vectorización y rasterización (Bernhardsen, 1999), cabe anotar que los SIG es un compendio de complementos que van más allá de la aplicación de un software, ya que estos no pueden existir por si solos y deben tener un equipo u organización dedicada a la implementación, mantenimiento y operación para el cumplimiento del objetivo propuesto (Maguire, 1991).

- Hardware: Los SIG requieren de máquinas de cómputo destinadas al procesamiento de información que van desde equipos individuales o en red y con la capacidad suficiente para desarrollar las diferentes actividades de análisis necesarios (Geoenseñanza, 2006).
- Software: Son programas que serán la base del SIG y deben cubrir las funciones y herramientas necesarias para el almacenamiento, análisis y visualización de información geográfica, en el momento existen diferentes productos con muy buenas capacidades para el desarrollo de estas funciones en donde algunos requieren de licencias comerciales y otros cuentan con libre distribución (Geoenseñanza, 2006).
- Información: Comprende un componente esencial dentro de la estructuración del SIG y requiere que los datos que la conforman sean lo más preciso posibles con la finalidad de poder dar una respuesta adecuada al objetivo del proyecto en cuestión, estos datos pueden ser obtenidos mediante recursos propios o proveedores (Geoenseñanza, 2006).
- Personal: Para una óptima implementación del sistema SIG es necesario contar con el personal capacitado en cargado de manejar toda la red de información (Geoenseñanza, 2006).
- Métodos: Corresponde a las reglas definidas y un adecuado diseño para lograr una implementación exitosa (Geoenseñanza, 2006).

Los modelos basados en SIG pueden estar conformados por archivos en formato vectorial y ráster en donde cada uno contiene información en una base de datos compuesta por atributos, los

ráster por su naturaleza asocia información en cada uno de los píxeles de la imagen y los procesos con estos archivos resultan ser relativamente sencillos que a diferencia del formato vectorial que está diseñado para describir puntos, líneas y polígonos los cuales requieren de una codificación más precisa y elaborada para la ejecución de los procesos, como el cálculo de geometrías de tipo perímetros, áreas y volúmenes mediante análisis espaciales. Los SIG admiten archivos como insumos en diferentes tipos de extensiones siendo esto uno de los puntos fuertes en cuanto a versatilidad para la conexión con otros softwares dedicados al almacenamiento de información y de representación gráfica (Morad & Triviño Pérez, 2001).

Para el desarrollo de los modelos SIG en la mayoría de las ocasiones la información como insumos provenientes de diferentes fuentes, es necesario realizar procesos de conversión o transformación como por ejemplos sistemas coordenados o de georreferenciación con la finalidad de poder trabajar bajo los mismos parámetros, es por ello por lo que los softwares SIG incluyen estas herramientas o funciones (Clarke, 1997). Entre las diferentes aplicaciones en que se ha involucrado los SIG, se encuentran:

- Cartografía: Es la construcción digital por parte de entidades públicas, que posteriormente liberan para consulta general y al cabo del tiempo realizar actualizaciones (Geoenseñanza, 2006).
- Infraestructura: Son sistemas encargados del almacenamiento de información de la conectividad de redes de servicios representados gráficamente y utilizados para fines de consulta, inventarios, ingeniería (Geoenseñanza, 2006).
- Gestión territorial: Son aplicaciones que permiten acceso rápido a distinto tipo de información de gran utilidad para trabajos de mantenimiento, empresas de servicios y con la facilidad de generar resultados mediante documentos (Geoenseñanza, 2006).
- Medioambiente: Es implementado por entidades ambientales para la ayuda en trabajos de tipo agrícolas, forestal, especies, ecosistemas, etc (Geoenseñanza, 2006).
- Equipamiento social: Se enfoca en el suministro de información destinada a la gestión de servicios de impacto social como; hospitales, escuelas, servicios sanitarios, etc (Geoenseñanza, 2006).

- Recursos mineros: Contiene información referente a la explotación de material generado durante varios años, permitiendo análisis de información en elementos puntuales, lineales, superficiales y volumétricos (Geoenseñanza, 2006).
- Tráfico: Destinado a la modelación de circulación de tráfico por una vía y estimar el coste de los puntos donde pueda existir un semáforo (Geoenseñanza, 2006)
- Demografía: Es un tipo de SIG basado en información de censos poblacionales, en donde se realizan consultas de diferentes tipos de datos como; negocios, servicios públicos, zonificación, etc (Geoenseñanza, 2006).

Actualmente, hay disponibilidad en el mercado diferentes tipos de herramientas SIG con grandes capacidades y potencialidades para el desarrollo de análisis espaciales, entre los más comunes se encuentra el ArcGIS y QGIS. A continuación, se da una breve descripción.

- ArcGIS: En la década del setenta (1962) fue creado el primer SIG por parte de Roger Tomlinson mediante un estudio que dio pie para la creación del Instituto de Investigaciones de Sistemas Ambientales - denominado ESRI que es una compañía dedicada al desarrollo de aplicaciones SIG y, por lo tanto, es la encargada de mantener y desarrollar ArcGIS (Pérez Guerra et al., 2023), es la plataforma a nivel mundial de los SIG que permite ejecutar una serie de acciones basadas en la información geográfica para la recopilación, organización, análisis y distribución, su implementación ha sido cada vez acogida por los sectores del gobierno, actores empresariales, educación, ciencia y medios. Esta plataforma de información geográfica ha ido avanzando en su accesibilidad a los diferentes tipos de usuario con entornos cada vez más dinámicos y sencillos mediante navegadores web, dispositivos móviles y equipos de escritorio (Esri, 2025).

El sistema ArcGIS a lo largo de su desarrollo se ha ido posicionando como una red de infraestructura destinada a la creación de mapas e información por parte de una comunidad SIG que puede ser aprovechada para el acceso de uno o varios usuarios de diferentes departamentos corporativos, o en su defecto al público en general, estos datos pueden ser combinados con información adicional para la creación de mapas con nuevos datos geográficos destinados a la consulta, análisis, planificación y administración. Este sistema tiene la capacidad de recopilar información para la creación de mapas de distintas fuentes

como; hojas de cálculo, bases de datos (DBMS), imágenes satelitales y aéreas en distintos formatos, archivos tipo KMZ y KML, etc. Adicionalmente, bajo este sistema se permite crear información geográfica digitalmente mediante el dibujo de entidades a partir de cartografías existentes (Esri, 2025). Es importante recalcar que para la implementación del sistema ArcGIS requiere de una licencia o suscripción para el uso de sus productos, aunque hay productos que permite únicamente la visualización y no requiere de licencias.

Figura 1

Plataformas de funcionamiento ArcGis.



Fuente: <https://tinyurl.com/2umw8jak>

- QGIS: Es un sistema SIG desarrollado que utiliza el lenguaje C++ lo que es eficaz en su ejecución empleando una interfaz gráfica, publicado bajo licencia pública - GNU, de naturaleza multiplataforma accesible para Unix, Linux, Windows, Mac OS y Android. Inicialmente este software estaba pensado como un visor de datos SIG, pero ha logrado una importante evolución en su desarrollo e implementación lo que lo ha convertido en un producto importante para el uso diario en diferentes entornos como personales e investigativos siendo una opción muy atractiva debido al ahorro en el costo de su adquisición y el gran potencial que brinda estando a la altura de sistemas que requieren un costo por licencia, este sistema tiene la capacidad en la lectura de información procedente de diferentes fuentes compiladas en archivos con extensiones variadas, como por ejemplo, el soporte de datos en formato ráster (Geotiff, JPG, ECW) o vectorial (Shapefile, GeoPackage, KML), además, cuenta con soporte para base de datos espaciales mediante PostGIS - extensión espacial de PostgreSQL. En este sistema SIG es posible trabajar con información de la web basada en mapas o imágenes de sensores remotos cargados en la red a través del Web Map Service donde se permite la consulta de datos georreferenciados. El

funcionamiento de QGIS puede ser ampliado mediante la implementación de complementos o plugins los cuales permiten potencializar diferentes tipos de actividades, estos son desarrollados por comunidades dedicadas a mejorar las capacidades de QGIS gracias a que es un software de código libre. (Bustos Catari, 2013).

8.2. Aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica en los Recursos Hídricos.

Diferentes investigadores han implementado las herramientas SIG destinadas a obtener información de tipo hidrológico para determinar características propias de las cuencas, como, por ejemplo; estimación de las cantidades de escorrentía sobre la superficie mediante la relación entre la permeabilidad del suelo y la precipitación, delineamiento de las cuencas para calcular el área de drenaje, entre otras. Una de las grandes ventajas de la implementación del SIG como plataforma es la capacidad de poder ejecutar modelos hidrológicos distribuidos basados en la variación espacial de las características hidrológicas de la superficie a lo largo de la cuenca, entre este tipo de distribución se encuentran las unidades de respuesta hidrológica - HRU que no obedecen directamente a la topografía sino a una clasificación de áreas homogéneas de la cuenca hidrográfica con características geo climáticas (Morad & Triviño Pérez, 2001).

Para desarrollar un análisis hidrológico que represente las condiciones y el alcance del estudio que se pretende elaborar, es importante tener en cuenta los insumos requeridos que deben ser preparados para lograr ejecutarlo, dentro de estos parámetros hay datos que pueden ser estimados o derivados implementando teledetección a partir de imágenes satelitales de modelos climatológicos cuando no se cuenta con información de campo procedente de estaciones, siendo esto un mecanismo especial (Pérez González & García Rodríguez, 2006).

Otra de las variables fundamentales que se puede obtener a partir de datos satelitales son las imágenes de modelos de elevación digital - MED, de donde se puede extraer de manera aproximada la superficie del terreno, por lo tanto, es recomendable sensores que logren capturar la superficie con mayor detalle que serán representados en imágenes con píxeles de menor tamaño, cabe resaltar que esta es una alternativa cuando no se dispone de la topografía de la zona de estudio (Roa Lobo & Ulrich, 2007).

Dentro de las capacidades que ofrecen los SIG como plataforma productiva para realizar análisis hidrológicos se cuenta con un número significativo de funciones o herramientas para el análisis espacial incluyendo; cambios de escala, reclasificación y transformación de datos, rutinas de interpolación, análisis de proximidad, superposición y combinación de capas de información, operaciones de vecindad y un complejo juego de operadores lógicos y aritméticos, estas funciones permiten integrar y combinar bases de datos conformadas por una gran cantidad de información organizada en diferentes tipos de atributos, lo cual es un atractivo significativo para adelantar investigaciones asociadas al campo de la hidrología (Morad & Triviño Pérez, 2001). Sin embargo, a lo descrito los SIG ofrecen un soporte apropiado para los análisis hidráulicos enfocados en la gestión de riesgo de inundaciones, en donde a partir de la superficie topográfica se puede establecer la geometría de la red drenaje y posteriormente obtener los niveles de las zonas susceptibles a inundación, velocidades y profundidades del flujo que se analizan para un determinado periodo de retorno de lluvias (Bozorg-Haddad Editor, 2021).

Estas funciones descritas propias de los sistemas SIG aplicadas a la gestión de recursos hídricos no solo aportan valor significativo e importante dentro de este campo de estudio sino también las tecnologías y herramientas de teledetección, que permiten el mapeo de redes hídricas y seguimientos a las zonas con presencia de fenómenos de sequía e inundación que provocan impactos graves sobre comunidades locales o regionales (Wang & Xie, 2018), todas estas herramientas sirven como una plataforma integral para las entidades o encargados de toma de decisiones - DSS (Morad & Triviño Pérez, 2001). Actualmente, varios entes territoriales han ido adentrándose en la aplicación de las herramientas SIG (Molina et al., 2005).

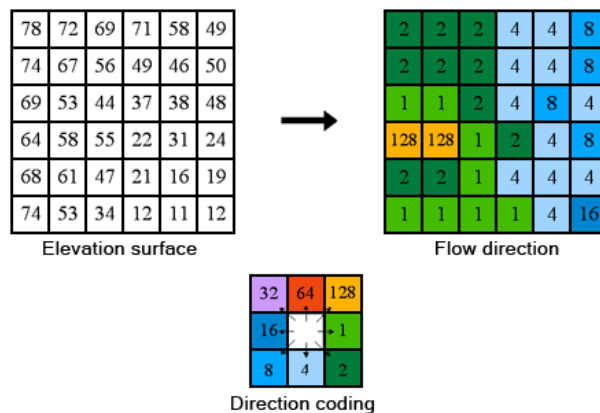
8.3. Análisis fundamentales en la gestión de los recursos hídricos implementando SIG.

En las siguientes líneas se describen procedimientos aplicados para la gestión de los recursos hídricos bajo la implementación de los sistemas SIG.

8.3.1. Preparación de datos y modelo de superficie.

- Modelo de elevación digital - MED: es la representación digital de la superficie terrestre que tiene una variable continua como altitud sobre una superficie bidimensional referenciada a un sistema coordenado, el empleo de estos modelos se ha incrementado debido a los datos provenientes de sistemas satelitales que permiten la generación de los MED a costos relativamente bajos y con alta accesibilidad que además pueden ser generados mediante mapas topográficos, fotografías aéreas, sistemas LIDAR e imágenes satelitales estereoscópicas, han sido implementados en diversos tipos de estudios en donde es necesario que la representación superficial sea lo más precisa posible (Roa Lobo & Ulrich, 2007) ya que diferentes tipos de parámetros propios del terreno pueden ser extraídos, derivados o calculados de estos archivos como una variable de insumo para modelos hidrológicos, hidráulicos o de procesos geomorfológicos (Van Westen, 1994).
- Dirección de flujo: Este procedimiento se sustenta en el algoritmo D8 y da como resultado un ráster con la orientación del flujo de las celdas vecinas calculado en función de las pendientes (Jumbo Castillo, 2015).

Figura 2
Algoritmo del D8.



Fuente: <https://tinyurl.com/mpp6fht7>

- Acumulación del flujo: Consiste en las celdas vecinas que drenan en particular a una sola y se obtiene a partir de la dirección del flujo resultante en un ráster (Jumbo Castillo, 2015).

- Delimitación de cuencas hidrográficas: este procedimiento consiste en trazar una línea divisoria o parte aguas que bordea desde los puntos de mayor altitud de la cuenca hasta el punto de salida del flujo de escorrentía superficial (Geraldí et al., 2010), debido a la revolución en la aplicación de sistemas SIG que cuenta con herramientas para la delimitación automática reemplazando el método tradicional basado en el uso de cartas topográficas (Jumbo Castillo, 2015).

8.3.2. Análisis espacial.

- Superposición de capas: es la combinación de dos o más capas o mapas que tienen el mismo sistema de referencia coordinado, para dar origen a una nueva capa que contiene la información de las capas iniciales (Jaime et al., 2011).
- Reclasificación de capas: este procedimiento se basa en la reasignación de valores en la capa de entrada para crear una nueva capa con datos que operan con una base “celda a celda”, en donde se simplifica la información inicial mediante rangos para un mejor análisis de los datos (Jaime et al., 2011).
- Relleno de vacíos: es la función encargada de rellenar los vacíos de elevación o sumideros creando pixeles donde existen agujeros, los vacíos son ocasionados cuando no hay información como puntos en el área del píxel (Roa Lobo & Ulrich, 2007).
- Usos de suelos: la distribución territorial de las poblaciones está conformada por una amplia variedad de coberturas de suelo que han sido desarrolladas por el hombre y dependen en gran medida de las condiciones socioeconómicas y culturales para el aprovechamiento de los recursos básicos, existen varios sistemas de clasificación de uso de suelos como el de la FAO en donde considera dos tipos de categorías; la primera consiste en el aprovechamiento de tierras rurales y la segunda en especificaciones técnicas más detalladas enmarcadas en las condiciones sociales y económicas (Calvano et al., 2014), esta información es relevante para de la toma de decisiones en gestiones enfocadas a la planificación territorial, ambiental y muchas otras áreas más, pero para esto es fundamental emplear herramientas especializadas dedicadas al análisis espacial como lo son los sistemas SIG, en donde dicha información se representa mediante capas que se visualizan a partir de polígonos y datos asociados a diferentes atributos, esta información de uso de suelos puede obtenerse

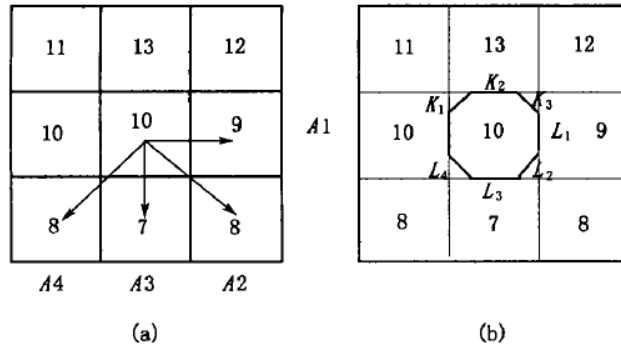
mediante levantamientos en el terreno que posteriormente se digitalizan ya sea directamente en un software SIG o aplicaciones CAD, también puede ser obtenido implementando procesos de teledetección a partir de imágenes satelitales u ortofotos extrayendo las diferentes coberturas ya sea con clasificación supervisada o no supervisada, con esta información extraída se elaboran los mapas con las diversas categorías de suelos, ya sea de tipo urbano o rural en donde cada uno es identificado de acuerdo a sus características (Martínez et al., 2016)

- Pendiente de los suelos: es una característica importante de los suelos que mide el grado de inclinación de la superficie y puede ser expresada en términos de grados o porcentaje, para realizar un análisis del terreno es fundamental implementar un sistema SIG en donde pueda ser procesado archivos como; los modelos de elevación digital en formato ráster aplicando herramientas para extraer las diferentes pendientes que contiene un área de estudio bajo el método de celdas o grids, las superficies tipo TIN y los métodos vectoriales que son el trazado de curvas de nivel el cual no ofrece demasiadas ventajas y practicidad en el cálculo (Conesa García, 1996).
- Índice de humedad topográfica - IHT: Este índice simula el escurrimiento de los flujos superficiales y subsuperficiales bajo la configuración topográfica de la cuenca, puede tomarse a manera de indicador tipo pronóstico para mostrar la ubicación de zonas que exponen alta saturación y concentración del escurrimiento actuando como rutas principales en los procesos de inundación (Roa Lobo & Ulrich, 2012), se define matemáticamente por la siguiente expresión ($\alpha/\tan\beta$) y para su cálculo cada una las variables deben ser estimadas de manera independiente (Kong & Rui, 2003), la variable α se define como $\alpha=A/L$, en donde (A) es el área de drenaje superior que descarga su contribución en una unidad de cuadrícula, (L) es la longitud de contorno efectivo en dirección al flujo, por lo tanto, la variable α indica cuantitativamente la porción de área que drenará pendiente debajo de la celda (Quinn et al., 1991).

Este índice se soporta sobre el algoritmo D8 para definir el flujo de escorrentía en donde se pueden obtener hasta 8 direcciones, cada una de las direcciones del flujo está afectada por un coeficiente de ponderación en sentidos cardinales de 0.5 y 0.38 diagonales (Quinn et al., 1991).

Figura 3

Algoritmo de distribución para dirección de flujo múltiple.



Fuente: (Kong & Rui, 2003)

Longitud de la línea de contorno perpendicular a la dirección a la:

Li: salida, Ki: entrada.

$L1=L3=K2$: $0.5 * \text{longitud del lado de la rejilla - dirección cardinal}$.

$L2=L4=K1=K3$: $0.35 * \text{longitud del lado de la rejilla - dirección diagonal}$.

Flujo ortogonal en una dirección.

$$\frac{\alpha}{\tan \beta} = \frac{A}{(0.5 * L) * \tan\left(\frac{\Delta h}{L}\right)}$$

Flujo diagonal en una dirección.

$$\frac{\alpha}{\tan \beta} = \frac{A}{(0.35 * L) * \tan\left(\frac{\Delta h}{\sqrt{2}L}\right)}$$

- Unidad de respuesta Hidrológica - HRU: estas unidades consisten en el cruce de información propia de una cuenca hidrológica que interactúan entre sí mediante procesos de superposición y que son implementadas para distintos fines que van desde la estimación de caudales hasta la evaluación del impacto del suelo (Castillo Sánchez & Gómez Plaza, 2002), la combinación general de las HRU están conformadas por el uso de suelo, tipo de suelo y pendientes, definidas dentro de los límites de la superficie de la cuenca hidrográfica, su creación origina una serie de polígonos en formato vectorial que subdivide la cuenca en diferentes clasificaciones conformadas por los archivos iniciales junto con una tabla de atributos donde registra estas diferentes clasificaciones resultantes, una de las herramientas o plugins empleados en los SIG para la creación de HRU's corresponde al SWAT que es un modelo hidrológico desarrollado que emplea la plataforma de ArcMap y Qgis con una serie de rutinas y procedimientos para la simulación de caudales, dentro de estas rutinas

hay una específica destinada a la creación de HRU's (García Reinoso et al., 2017) , ahora, dependiendo el análisis que se desee elaborar y la disponibilidad de datos las HRU pueden ser personalizadas lo cual quiere decir que los mapas o capas (información de insumo) que la conforman pueden ser totalmente distintos a los mapas típicos de uso, suelo y pendiente, esto permite dar una gran ventaja dentro de los enfoques de modelación y análisis.

8.3.3. *Softwares SIG en los recursos hídricos.*

Los sistemas SIG son aplicaciones muy versátiles como herramientas para la gestión de los recursos hídricos, ya que para desarrollar un análisis en esta área se encuentran disponibles diferentes tipos de paquetes o softwares con amplias capacidades tanto para simulaciones hidrológicas como hidráulicas, entre estos paquetes hay líneas de desarrollo que implica la adquisición de licencias, pero a su vez hay otras opciones basadas en código abierto que son softwares desarrollados por comunidades dedicadas al lanzamiento y mantenimiento de estas plataformas lo cual supera la barrera económica para adelantar las simulaciones ya sea para propósito educativo, investigativo o de consultoría (D. Rodríguez et al., 2018).

- ENVI: Software especializado en teledetección lanzado al mercado desde 1991 y dedicado especialmente al tratamiento de información a partir de imágenes y datos geoespaciales, contiene una gran capacidad para el procesamiento, análisis y visualización de la información capturada por sensores remotos, satélites, aviones y drones, debido a sus optimas herramientas para la transformación de imágenes en conocimiento útil de recurso esencial en diferentes tipos de áreas del conocimiento desde la industria hasta la investigación científica pasando por la gestión ambiental y territorial (ENVI, 2025), donde las herramientas y conocimientos se combinan para la ayuda en la toma de decisiones (Talavera Pereira, 2007).
- Hec-RAS: Es un software dedicado a la modelación hidráulica de cauces naturales o artificiales, desarrollado por el cuerpo de ingenieros de la armada de Estados Unidos, su diseño se basa en realizar cálculos de flujo constante, inestable, sedimentos, temperatura y calidad del agua, este programa cuenta con un componente SIG que le permite la lectura de información geométrica del cauce para ser empleada en el proceso de modelamiento,

adicionalmente, cuenta con un módulo para visualizar sus resultados y de ser necesario pueden ser exportados dichos resultados desde el modelador con la información necesaria para cargarse dentro del entorno de ArcGIS utilizando el complemento de HECgeoRAS (D. Rodríguez et al., 2018), pero también existe la posibilidad de exportar resultados a QGIS mediante el software GISWater que sirve como conexión entre los dos programas, es importante denotar que con el aplicativo GISWater se crea una línea de trabajo de implementación de software libre en donde no se requiere inversión económica a diferencia del HECgeoRAS donde este conecta con el ArcGIS el cual necesita de una licencia para su ejecución (D. Rodríguez et al., 2018), posteriormente a estos procedimientos se pueden proceder a elaborar mapas de riesgo o análisis de resultados.

- HEC-HMS: Software dedicado a la modelación hidrológica desarrollado por parte del cuerpo de ingenieros de la armada de Estados Unidos, cuenta con funcionalidades SIG para la ejecución de módulos que requieran de datos georreferenciados, tanto en la preparación del modelo como visualización de los resultados, el software permite edición de algunos elementos mediante herramientas que incluye, pero en caso de requerir ajustes más complejos es necesario disponer de una herramienta SIG (Cabrera-Balarezo et al., 2019).

8.4. Sistemas urbanos de drenaje sostenible - SUDS.

Los SUDS considerados como infraestructura verde (Ossa-Moreno et al., 2017) son un complemento al sistema de alcantarillado convencional (Ferrans et al., 2022), por lo tanto, estos sistemas alternativos para el control de las aguas lluvias y que hacen parte de la red de drenaje de una ciudad, tienen como función principal disminuir los efectos causados por los cambios sobre la superficie de una cuenca en donde se ha modificado la dinámica de la infiltración - escorrentía debido a las diferentes intervenciones antrópicas que alteran el ciclo hidrológico, es por ello que los mayores problemas de drenaje surgen en áreas urbanas donde las superficies han sido reemplazadas por coberturas impermeables reduciendo la capacidad de infiltración en momentos de precipitaciones, esto es expresado por (Trapote Jaume, 2016) en donde menciona que en un área natural entre el 80% y 90% se infiltra y del 20% al 10% escurre, pero en zonas altamente urbanizadas y densificadas la infiltración va del 0% al 10% y por consiguiente la escorrentía es del 90% al 80%, por lo tanto, los sistemas SUDS buscan lograr recuperar las condiciones naturales

antes de las intervenciones y puede ser logrado implementando estructuras adecuadamente diseñadas para la mitigación del impacto de inundación a partir de la retención del agua de escorrentía aplicando procesos de infiltración, mejoras en la calidad del agua, reutilización del agua junto con la generación de aspectos estéticos y paisajísticos agradables (Mejía Puentes, 2024).

La selección y ubicación de los sistemas SUDS debe basarse previamente en la aplicación de herramientas fundamentales como el modelado en donde se predice el comportamiento del sistema aplicado junto con el impacto dentro del área urbana, adicionalmente, al modelado la implementación de matrices multicriterio son herramientas que ayudan en muy buena medida en el apoyo de la toma de decisiones (Ferrans et al., 2022).

La aplicación de los SUDS ha conllevado a la creación de nuevas alternativas o tipologías que proporcionan ventajas y beneficios (Bermúdez Valero, 2021), a continuación, se da una breve descripción de acuerdo con la “Guía metodológica para la formulación e implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible del Ministerio de vivienda”.

Techos verdes:	Compuesto por capas de material filtrante sobre techos que permiten el desarrollo de vegetación para la absorción del agua lluvia y posteriormente conducirla mediante sistema de drenaje o tubería.
Fachadas verdes	Sistemas diseñados para el desarrollo de vegetación en superficies verticales, clasificados en tres tipos: soporte para enredaderas, sistemas en base de sustrato, sistemas hidropónicos.
Tanques de almacenamiento:	Son utilizados para la recolección de agua lluvia de los tejados en las viviendas, donde el agua se almacena, para posteriormente reutilizarlo en los requerimientos de agua al interior de la vivienda y así reducir el consumo de agua potable.
Alcorques inundables:	Es una caja que tiene una función tipo matera en donde contiene un árbol, este sistema al interior cuenta con tuberías para el manejo de aguas entrantes y salientes.
Humedales	Son ecosistemas con gran riqueza biótica que cuentan con características terrestres y acuáticas, estas zonas son por lo general de baja profundidad.

Cunetas verdes:	Son elementos poco profundos y están dimensionados de acuerdo con el diseño, la vegetación permite tratar la escorrentía, reducir la velocidad, pero en casos de pendientes altas se pueden incluir barreras y en pendientes bajas instalar tuberías perforadas para evitar el estancamiento del agua al interior.
Cuencas secas:	Es una tipología que requiere de grandes extensiones y se encuentra en niveles inferiores del área urbanizada, en esta área el agua se acumula para posteriormente infiltrarse en las capas internas del suelo o evaporarla.
Zonas inundables:	Son áreas extensas con depresiones de nivel acotadas por taludes y generalmente secas que sirven para el ingreso de las aguas lluvias ya se de manera superficial o mediante tuberías, antes del ingreso es recomendable que flujo del agua pase por cámaras para disipar la energía.
Zanjas de infiltración	Es una zona destina al almacenamiento de agua por escorrentía, para posteriormente infiltrarla en las capas del subsuelo.
Tanques de infiltración	Son dispositivos que están enterrados en el suelo contruidos a base de polipropileno o geotextiles, permitiéndoles retener agua lluvia en su interior para luego ser transferida al interior del suelo.
Pavimentos permeables:	Compuesto por materiales porosos permitiendo el paso del agua al interior de su estructura, en donde el agua irriga la vegetación adyacente, con la ventaja de poseer la misma resistencia de los pavimentos convencionales
Jardín microcuenca:	Presentan un desnivel con respecto a la superficie adyacente formando un canal para el recorrido del agua lluvia, en donde se retiene para luego infiltrar. Este sistema permite depurar el agua lluvia, se componen de suelo mejorado
Jardín de lluvia:	con vegetación junto con un sistema para el manejo de excesos, dependiendo del nivel de infiltración puede requerir capas subterráneas.
Pozos de infiltración	Son espacios excavados al interior del suelo con el objetivo de infiltrar el agua lluvia, están contruidos en concreto o mampostería presentando orificios que permite el flujo del agua retenida a las capas permeables del suelo.
Zanja - bordo:	Son zanjas que utilizan bordes para la captación y retención de agua lluvia, son utilizados en terreno con pendiente.

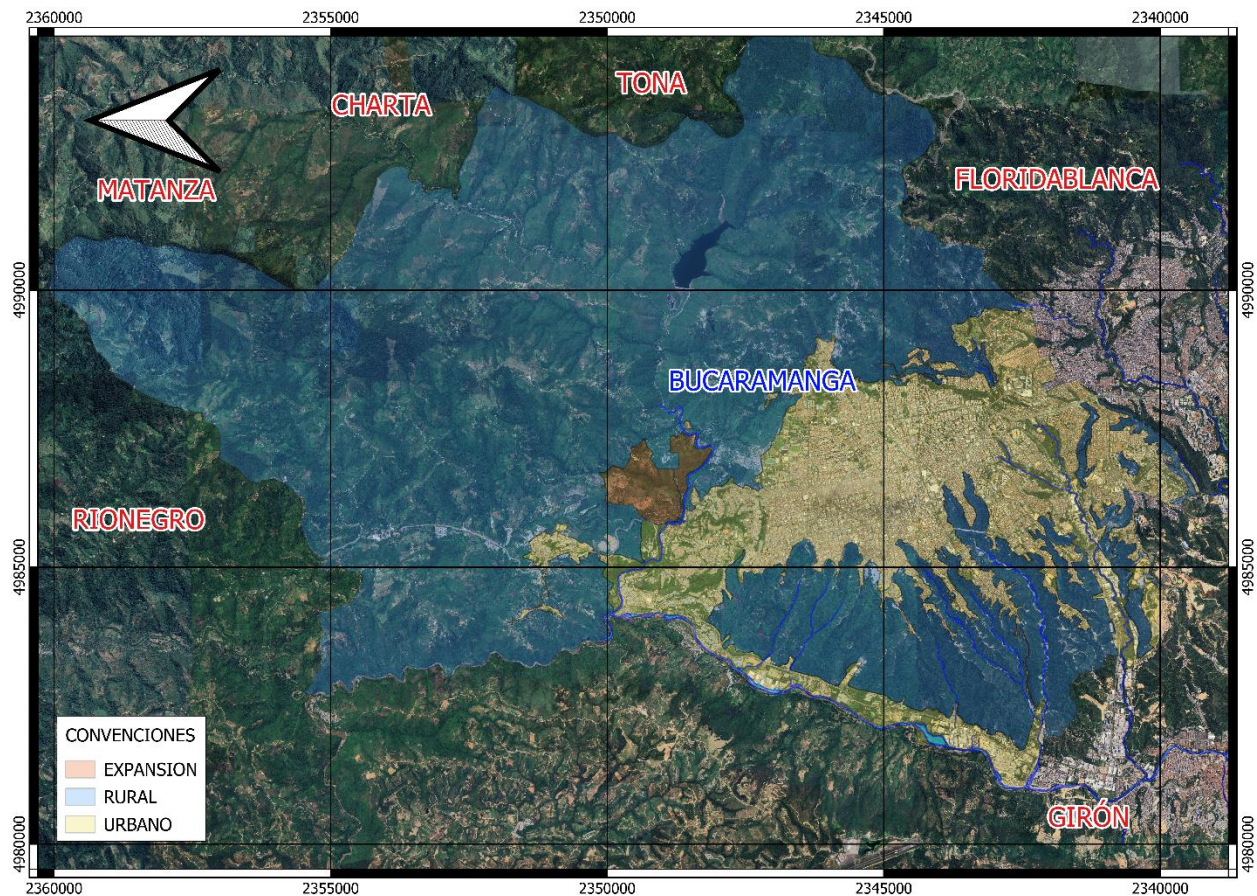
La elección de la tipología de un sistema SUDS para su correcto funcionamiento debe garantizar la capacidad adecuada desde la perspectiva hidráulica pasando hasta la estabilidad geotécnica y estructural, por lo tanto, el componente hidráulico adquiere relevancia ya que es el encargado de obtener el caudal de diseño a partir de métodos para la cuantificación de la cantidad de agua de escorrentía directa que ingresará a un determinado sistema SUDS. La obtención de caudales de diseño ligados a caudales máximos de un determinado periodo de retorno requiere la necesidad de implementar curvas de intensidad - duración - frecuencia (IDF) para la zona de estudio, estos sistemas como mecanismos encargados de gestionar la reducción de los fenómenos de altas precipitaciones que conllevan a eventos de inundación deberán ser articulados adecuadamente en el entorno urbano y su mobiliario en conjunto con el sistema de alcantarillado existente, para esto se debe garantizar criterios de diseño con propósitos de seguridad pública, protección de la salud y un adecuado entorno ambiental bajo los principios de nivel de servicio, sustentabilidad y costos (MINISTERIO DE VIVIENDA, 2022).

Como se ha descrito en líneas anteriores estos sistemas se han posicionado como una alternativa innovadora para la gestión eficiente de drenaje en zonas urbanas aplicándose tanto en áreas nuevas como existentes, pero incluso con las ventajas que proporcionan estos sistemas no siempre se garantiza un adecuado funcionamiento debido a los siguientes inconvenientes, en primer lugar se debe al desconocimiento de las tecnologías aplicadas como alternativa a soluciones convencionales y donde el personal profesional encargado de la operabilidad no están totalmente capacitado para ejercer un óptimo mantenimiento, el segundo aspecto se debe a la interacción con otros elementos urbanos que no han sido diseñados para procesos de drenaje junto con un reducido conocimiento en los mecanismo de conexión con otros sistemas, por último, la implementación de una tipología de SUDS requiere la intervención de diferentes disciplinas profesionales en donde la comunicación y comprensión del funcionamiento para el cual se diseña puede perder su funcionalidad debido a errores en la toma de decisiones (MINISTERIO DE VIVIENDA, 2022).

9. Sitio de Estudio.

El sitio de estudio comprende el municipio de Bucaramanga correspondiente a la capital del departamento de Santander - Colombia, perteneciente a la provincia de Soto, se encuentra al nororiente del país sobre la cordillera Oriental de los Andes conformando el área metropolitana - AMB (Alcaldía de Bucaramanga, 2025). Ubicada sobre las coordenadas 4986317.23N y 2345423.09E referenciadas a la proyección Magna Colombia - Origen Nacional 2018. El área de estudio se enfocará sobre la zona Urbana.

Figura 4
Ubicación del Municipio de Bucaramanga.



Fuente: Propia - elaborada en Qgis.

10. Metodología.

Los insumos para desarrollar el proyecto han requerido la consecución de información propia de la zona de estudio que posteriormente ha sido recopilada, tratada, organizada y procesada, de acuerdo con los requerimientos para los archivos que serán parte de las variables de análisis en la elaboración de la matriz multicriterio, estos procesamientos fueron realizados con el apoyo de softwares (Microsoft Excel, AutoCAD, ArcGIS Pro, ArcMAP y Qgis).

10.1. Selección de parámetros espaciales asociados a los riesgos de inundaciones – OE1.

La información recopilada fue de tipo secundario, en donde se consultaron bases de datos digitales y portales web descargándose archivos en formatos txt, dwg, csv, shp y kmz. Adicionalmente, para el análisis se derivó información a partir de datos iniciales, que posteriormente conformaron nuevas variables, por lo tanto, dentro de las estrategias para determinar las zonas susceptibles a inundación en el área de estudio mediante el empleo de las herramientas SIG y posteriormente indicar los mecanismos posibles de contención o mitigación a través de los sistemas SUDS, se pretende implementar la creación de unidades de respuesta hidrológica - HRU como el método de cruce de información que estarán conformadas por el índice de humedad topográfica - IHT, uso de suelo y pendientes. Estas HRU's pretende determinar las zonas que comparten las mismas condiciones homogéneas en donde se busca una mayor precisión en los procesos de generación de escorrentía y distribución de humedad del suelo.

Dos de estas variables a implementar (Pendiente e IHT) dependen estrictamente de un Modelo de Elevación Digital - MED, ya que este determina la configuración espacial de la superficie del terreno.

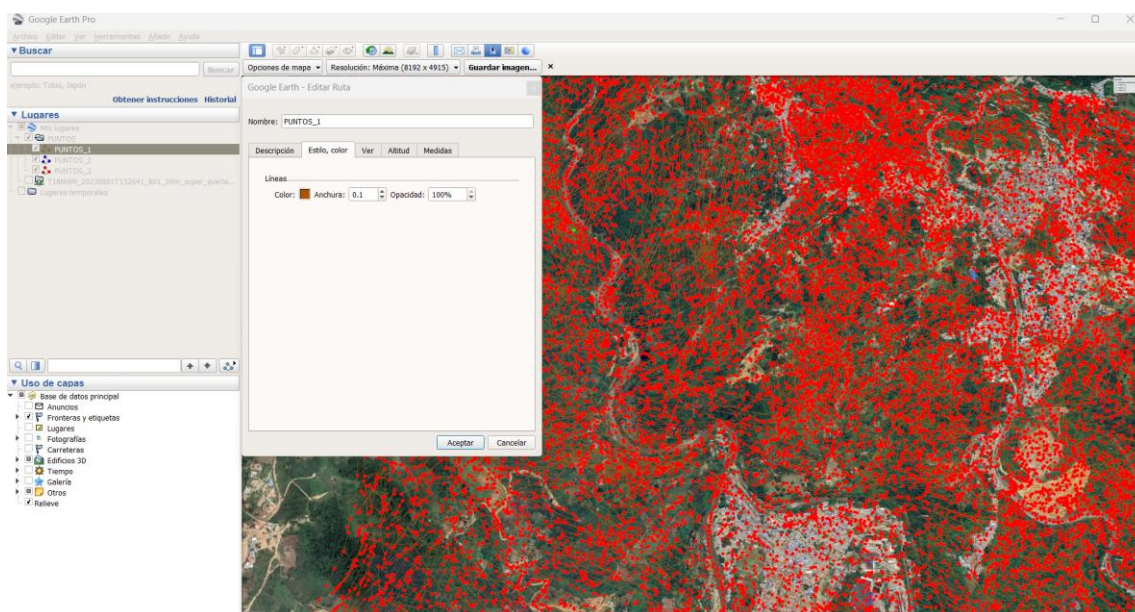
Cabe anotar para el desarrollo del proyecto se adoptará como sistema de proyección de coordenadas MAGNA Colombia - Origen Nacional 2018.

10.1.1. Obtención del Modelo de Elevación Digital - MED.

La recolección de datos de topografía para la creación del MED de la zona de estudio en este caso el municipio de Bucaramanga, se optó por extraerla del aplicativo - Google Earth, cabe mencionar que esta información no es exacta, pero da una muy buena base de la configuración espacial de la superficie, la extracción de esta información se logró en el aplicativo mediante la herramienta denominada “ruta”, en donde se genera una serie de puntos a manera de levantamiento junto con la captura de las coordenadas, por consiguiente, fue necesario extraer la mayor cantidad posible para definir lo adecuadamente la superficie.

Figura 5

Puntos extraídos de google earth.



Fuente: Google Earth.

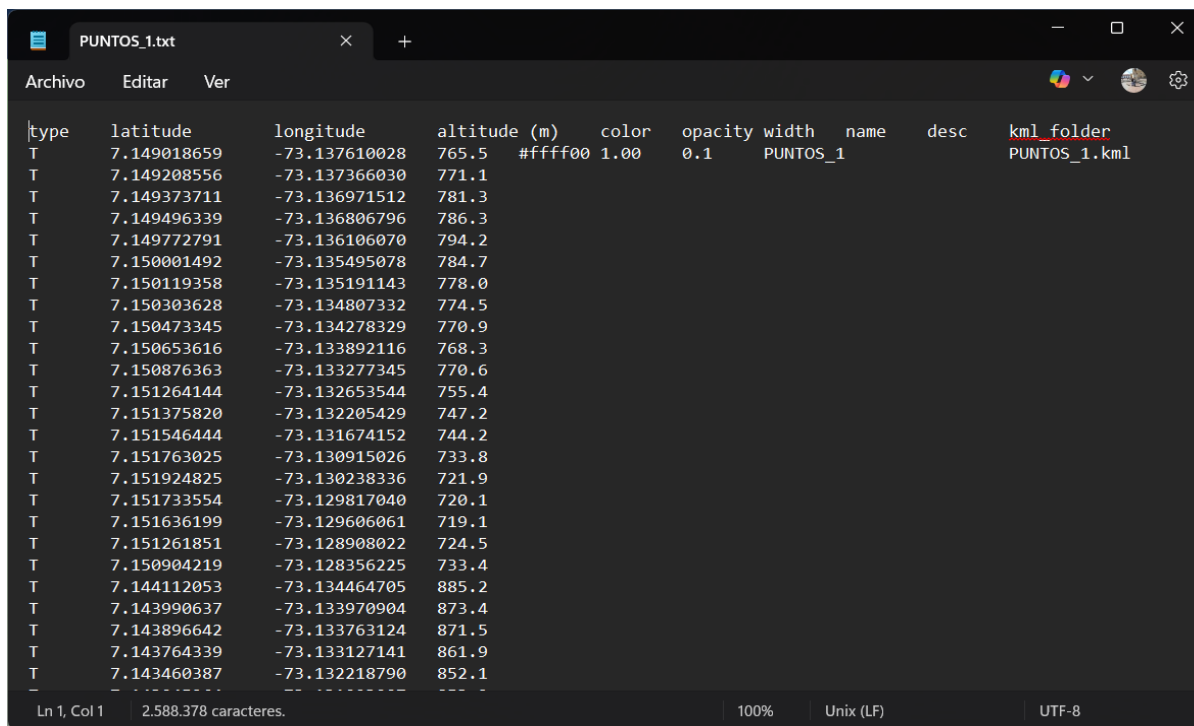
Posteriormente, estos puntos extraídos fueron exportados y almacenados en formato KMZ para luego cargarlos en la plataforma virtual “GPS Visualizer”, con el propósito de obtener la elevación de cada uno de los puntos generados mediante la herramienta ruta de Google Earth.

La plataforma GPS Visualizer, para proporcionar la altura emplea bases de datos de modelos digitales - MED, como NED/3DEP, NASA1, ODP1, ASTER, SRTM3 (AdamSchneider,

2003), una vez procesada la información esta plataforma devuelve un archivo descargable en formato .txt con la elevación de los puntos - Figura 6.

Figura 6

Listado de puntos con alturas - procesamiento.



The image shows a text editor window titled 'PUNTOS_1.txt'. The window displays a list of points with the following columns: type, latitude, longitude, altitude (m), color, opacity, width, name, desc, and kml_folder. The data is as follows:

type	latitude	longitude	altitude (m)	color	opacity	width	name	desc	kml_folder
T	7.149018659	-73.137610028	765.5	#ffff00	1.00	0.1	PUNTOS_1		PUNTOS_1.kml
T	7.149208556	-73.137366030	771.1						
T	7.149373711	-73.136971512	781.3						
T	7.149496339	-73.136806796	786.3						
T	7.149772791	-73.136106070	794.2						
T	7.150001492	-73.135495078	784.7						
T	7.150119358	-73.135191143	778.0						
T	7.150303628	-73.134807332	774.5						
T	7.150473345	-73.134278329	770.9						
T	7.150653616	-73.133892116	768.3						
T	7.150876363	-73.133277345	770.6						
T	7.151264144	-73.132653544	755.4						
T	7.151375820	-73.132205429	747.2						
T	7.151546444	-73.131674152	744.2						
T	7.151763025	-73.130915026	733.8						
T	7.151924825	-73.130238336	721.9						
T	7.151733554	-73.129817040	720.1						
T	7.151636199	-73.129606061	719.1						
T	7.151261851	-73.128908022	724.5						
T	7.150904219	-73.128356225	733.4						
T	7.144112053	-73.134464705	885.2						
T	7.143990637	-73.133970904	873.4						
T	7.143896642	-73.133763124	871.5						
T	7.143764339	-73.133127141	861.9						
T	7.143460387	-73.132218790	852.1						

The status bar at the bottom indicates 'Ln 1, Col 1', '2,588,378 caracteres.', '100%', 'Unix (LF)', and 'UTF-8'.

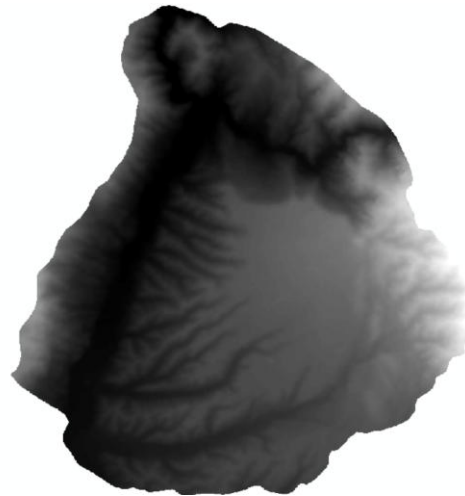
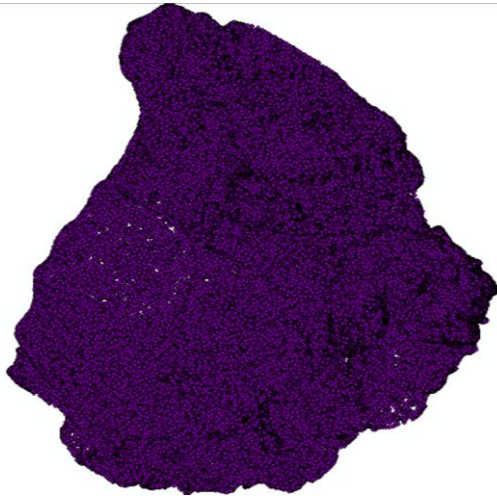
Fuente: Propia

Obtenida esta información se cargó en la plataforma ArcMap creando un archivo shapefile tipo punto, luego se proyectaron las coordenadas geográficas WGS84 a planas de tipo MAGNA Colombia - Origen Nacional 2018 dando origen a un nuevo archivo tipo shapefile. Con los puntos proyectados dentro de esta misma plataforma se procedió a crear la superficie tipo TIN y posteriormente el modelo de elevación digital MED.

Figura 7

Conjunto de puntos y MED.

- Puntos de elevación.
- Modelo de elevación digital - MED.



Fuente: Propia

El modelo de elevación digital fue creado en formato .tiff y resolución de 0.5m x 0.5m, esta resolución se tomó con la finalidad de lograr detallar y obtener precisión en la superficie del terreno.

10.1.2. Obtención del índice topográfico de humedad - IHT.

Una vez creado y obtenido el MED se procedió a calcular primero el Índice de Humedad Topográfica - IHT. Para la creación de este mapa, fue necesario realizar varios procesamientos consecutivos sobre el modelo de elevación digital - MED y llevado a cabo mediante ArcMap, el procedimiento es el siguiente.

1. Corrección de vacíos o sumideros del MED, mediante la herramienta FILL.
2. Creación de la dirección del flujo a partir de la corrección de vacíos.
3. Creación de la acumulación del flujo a partir de la dirección.
4. Creación del mapa de pendientes en grados (Slope).

A partir de los siguientes puntos fue necesaria la aplicación de la calculadora Ráster.

5. Creación de la pendiente media.

$$SR = \frac{\text{Slope} * 1.570796}{90}$$

6. Creación de la tangente de la pendiente.

$$ST = \text{Condicional}(SR > 0, \text{Tan}(SR), 0.001)$$

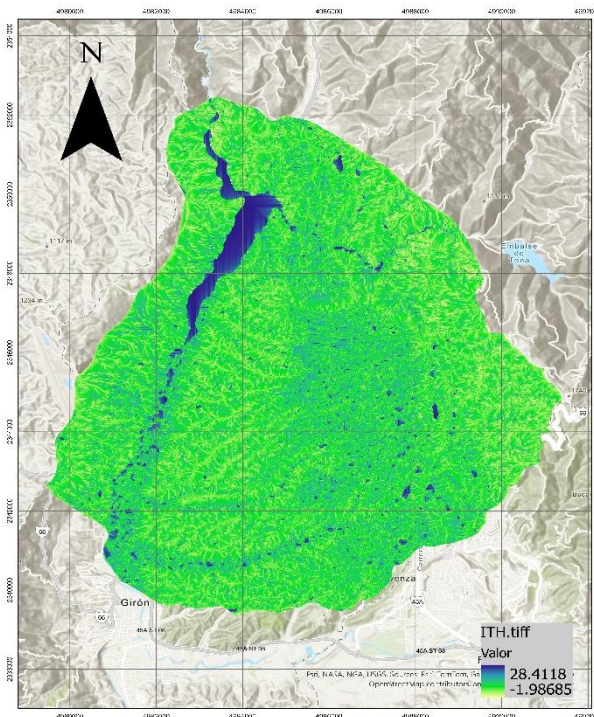
7. Cálculo de la superficie de contribución.

$$UCA = (\text{Acumulación} + 1) * \text{tamaño del pixel}$$

8. Cálculo del índice Topográfico.

$$IHT = \text{Ln}\left(\frac{UCA}{ST}\right)$$

Figura 8
Mapa Índice de humedad topográfica - IHT.



Fuente: Propia - elaborada en Arcgis Pro.

10.1.2.1. Reclasificación capa índice de humedad topográfica.

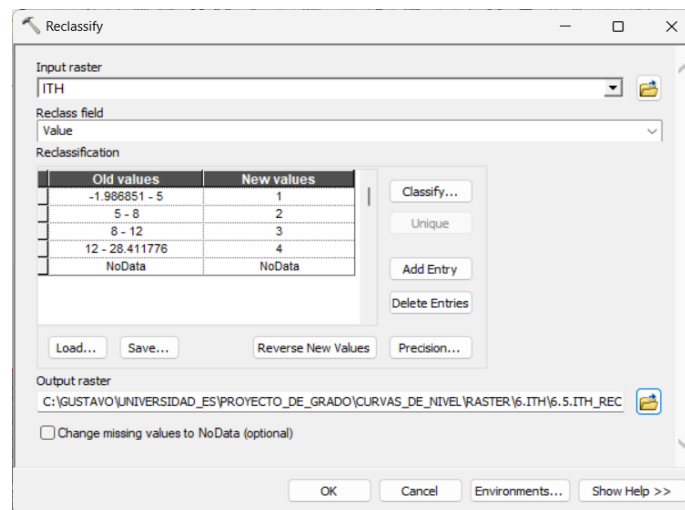
Una vez obtenido el ráster del IHT se procedió a realizar la reclasificación utilizando “Reclassify” de la caja de herramientas “3D Analysis Tools” del ArcMap, esta reclasificación está compuesta por 4 rangos que simplifican el ráster de datos continuos de la humedad topográfica como se muestra en la Figura 9 - formato resultante .tiff..

Tabla 1
Reclasificación - IHT.

Tipo de humedad	Rangos		Categoría Proyecto
	De	A	
baja	-1.98	5	1
media	5	8	2
alta	8	12	3
Muy alta	12	28.41	4

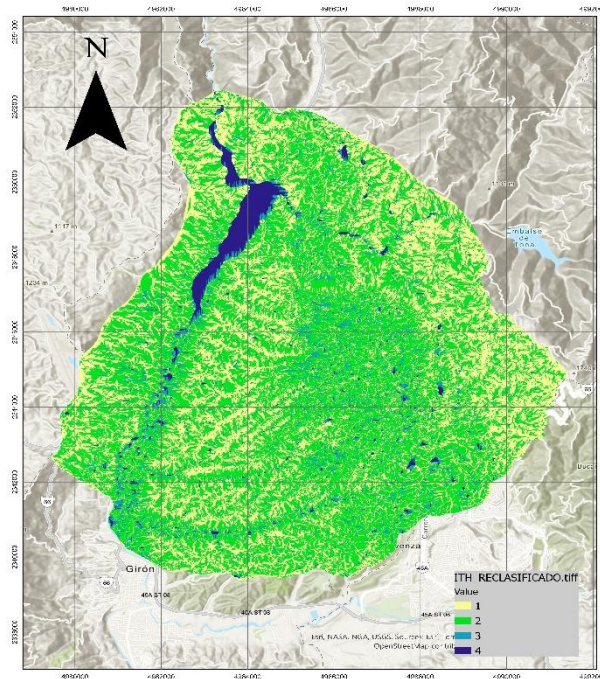
Fuente: Propia.

Figura 9
Rangos de reclasificación - IHT.



Fuente: Propia

Figura 10
Mapa IHT (Reclasificado).



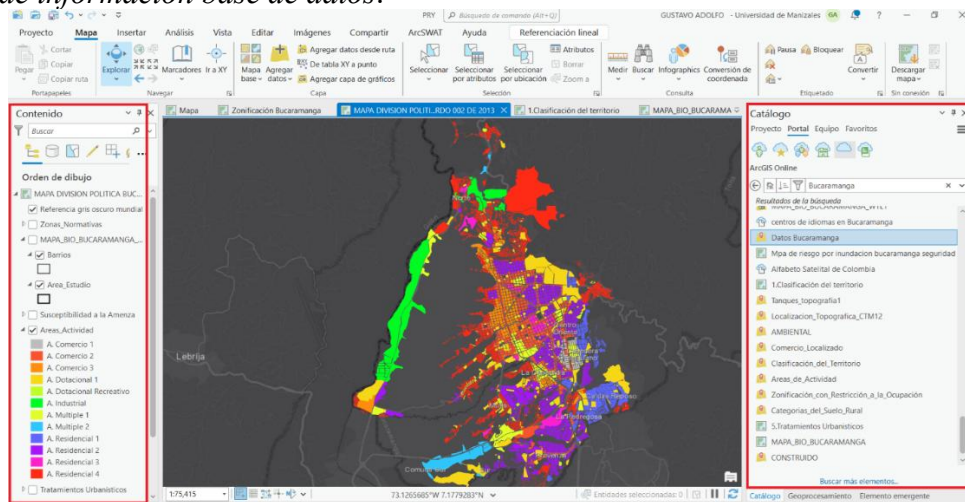
Fuente: Propia - elaborada en Arcgis Pro.

10.1.3. Obtención capa uso de suelos.

Este insumo o variable requerida se solicitó a la entidad oficial - alcaldía de Bucaramanga mediante correo electrónico institucional dirigido a la secretaria de planeación municipal, donde se informaba acerca del propósito, tratamiento y finalidad dicha información, esta solicitud fue radicada el día 08 de abril del 2025 con respuesta obtenida el día 22 de abril del mismo año, en la respuesta emitida se da indicaciones de dirigirse mediante link a los documentos digitales del POT en la página web de la alcaldía y visor interactivo de ArcGIS online, donde se encuentran las capas referentes a los usos que tiene la ciudad, pero debido al alcance de este proyecto se requiere que dicha información pueda ser procesada en formatos editables y la respuesta obtenida por parte de la alcaldía no fue favorable, por lo tanto, fue necesario realizar búsqueda en portales web y demás bases de datos donde se lograra obtener la información para proceder con la ejecución del objetivo trazado.

Dentro de las diferentes búsquedas se procedió investigar en la base de datos de ArcGIS Online de ArcGIS Pro, en el buscador se indicó la palabra “Bucaramanga” arrojando una serie de resultados como se muestra en la Figura 11, de esta búsqueda se extrajo varios archivos en formato shapefile (.shp), entre los que se encuentran los usos de suelo en la capa “Areas_Actividad”.

Figura 11
Búsqueda de información base de datos.

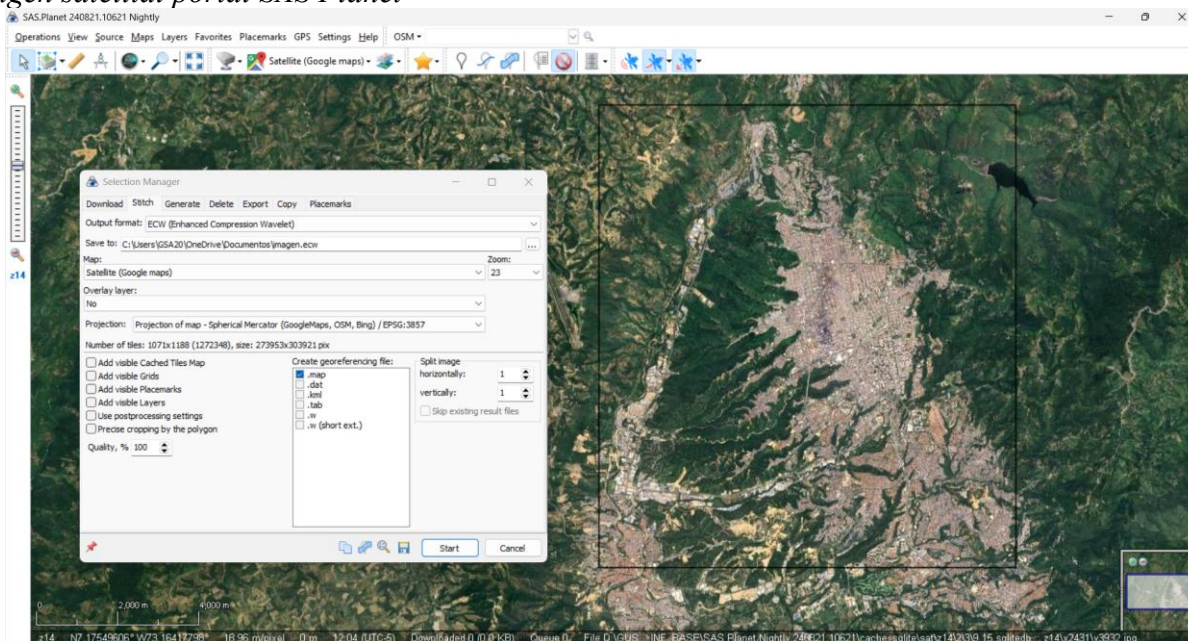


Fuente: Propia

Obtenida esta información fue necesario realizar un procesamiento de depuración de los polígonos de las zonas por las áreas de actividad, ya que hay diferentes zonas en este archivo que presenta desactualización con respecto a la realidad actual, para ello fue necesario cruzar estos datos con una imagen satelital descargada y así proceder a realizar los ajustes correspondientes.

La imagen satelital empleada para realizar la corroboración de los datos de usos de suelos fue descargada del portal de SAS PLANET en formato (.ECW), dicha imagen generó un tamaño en disco de 961MB teniendo en cuenta que este es un formato de compresión lo cual permite reducir el tamaño original.

Figura 12
Imagen satelital portal SAS Planet



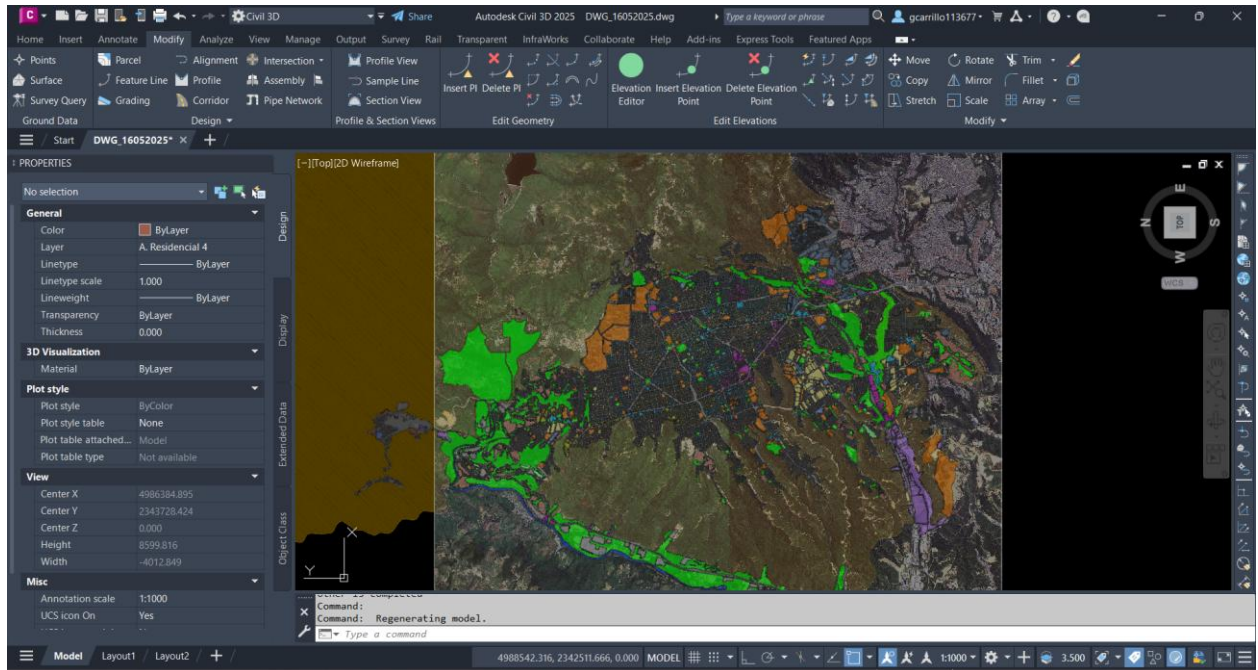
Fuente: SAS Planet.

Descargada esta imagen fue necesario realizar la proyección de cambio de coordenadas de WGS84 a MAGNA Colombia - Origen Nacional 2018, teniendo en cuenta que este es el sistema de coordenadas adoptado para el trabajo. La proyección se efectuó mediante ArcMap donde se exportó la imagen a formato .TIFF, pero con esta última extensión se obtuvo un tamaño en disco de 30.3GB, por lo tanto, debido al peso fue necesario realizar la compresión de la imagen proyectada al formato (.ECW) mediante Global Mapper y posteriormente tomar esta imagen para el proceso de corroboración o edición.

El proceso de depuración de información para la obtención del mapa de uso de suelos se llevó a cabo en el entorno de AutoCAD Civil 3D debido a que este programa contiene mejores herramientas para la edición de datos tipo SIG, por lo tanto, fue necesario importar las diferentes capas de shapefile mediante el comando (MAPIMPORT), este software permite trabajar de manera más eficiente logrando generar adecuadamente las fronteras mediante los vértices de los diferentes polígonos evitando que se generen traslapes indebidos.

Dentro de las ediciones realizadas a la información se trató de separar en polígonos las diferentes categorías construidas con las zonas verdes.

Figura 13
Edición en AutoCAD.



Fuente: Propia.

La capa de uso de suelos está compuesta por las diferentes actividades desarrolladas en el municipio, junto con las vías y zonas verdes.

Las actividades desarrolladas de acuerdo con el Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Bucaramanga POT - corresponden a: Comercio 1, Comercio 2, Comercio 3, Dotacional 1, Dotacional Recreativo, Industrial, Múltiple 1, Múltiple 2, Residencial 1, Residencial 2, Residencial 3, Residencial 4.

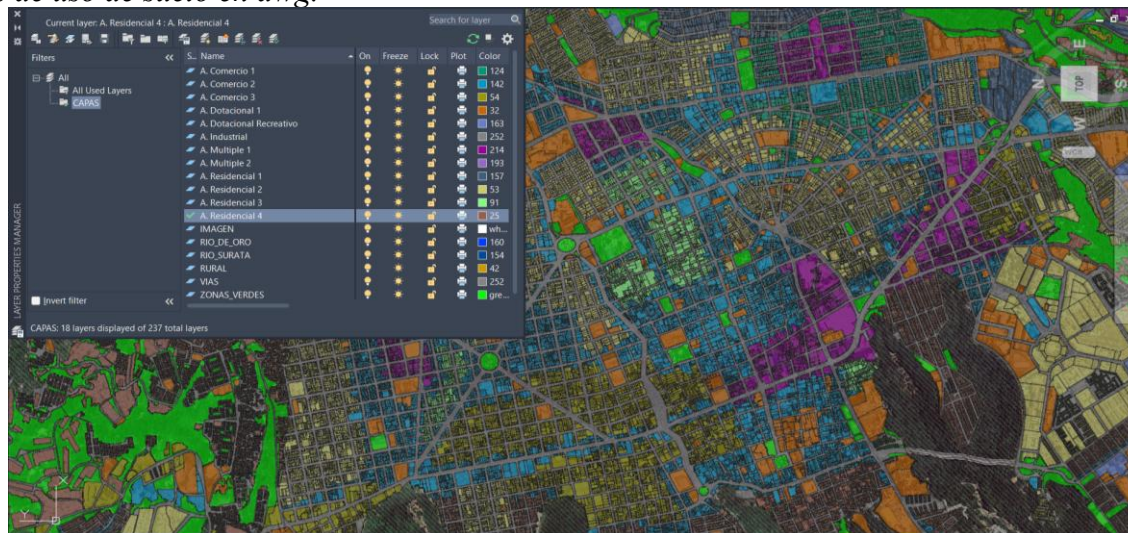
Una vez realizada la edición de las capas de las actividades desarrolladas y las zonas verdes, se procedió a generar la capa de las vías que son las áreas intermedias entre polígonos de manzanas, se emplearon los siguientes procedimientos aplicando el software QGIS.

1. Compilación de todas las capas vectoriales de las actividades desarrolladas y zonas verdes en una sola capa empleando la herramienta “unir capas vectoriales”.
2. Compiladas las capas en una sola unidad vectorial, en donde se unieron los polígonos pequeños con los adyacentes resultando en polígonos más grandes, mediante la herramienta “dissolver”.
3. Para generar la capa vía del uso de suelos, en la búsqueda de información de la base de datos en ArcGIS Online se obtuvo la capa “Clasificación del territorio”, que está compuesta por el polígono Urbano, Rural y expansión urbana, de esta capa se extrajo el polígono Urbano, posteriormente, se cruzó con la capa que fue disuelta en el paso anterior utilizando la herramienta “diferencia”.

Obtenida la capa vía se completan las diferentes capas de uso de suelos, luego se procedió a exportar las diferentes capas editadas en AutoCAD de .dwg a tipo shapefile empleando el comando “MAPEXPORT”.

Con la capa de vías obtenida, se procedió a compilar o unir con el archivo vectorial del punto 1 para generar una sola capa o archivo tipo shapefile de uso de suelos.

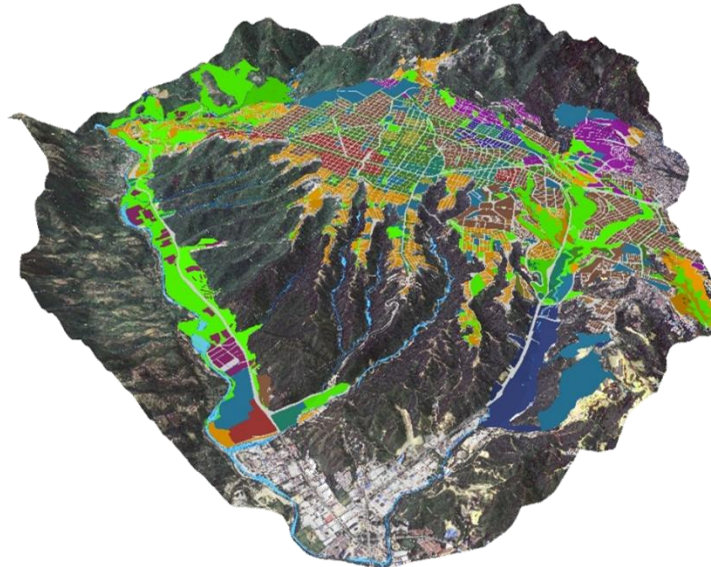
Figura 14
Capas de uso de suelo en dwg.



Fuente: Propia.

En la siguiente imagen se muestra la ubicación de la capa de uso de suelos sobre el área urbana, la creación de esta imagen fue realizada utilizando el ArcScene.

Figura 15
Capas de uso de suelo.



Fuente: Propia - ArcScene.

10.1.3.1. Reclasificación capa uso de suelos.

Una vez generado el archivo vectorial o capa de usos de suelos se obtuvieron 16 clasificaciones que estaban asociadas directamente a los archivos extraídos de la base de datos, esta capa de uso de suelos está conformada por 62949 polígonos en donde cada uno tiene un registro en la tabla de atributos, ahora, con la finalidad de mejorar la clasificación de los usos de suelo se optó por reclasificar de acuerdo con la metodología Corine Land Cover y para esto se preparó la Tabla 2 en donde relacionan las 16 clasificaciones iniciales y la respectiva clasificación CLC.

Adicionalmente, se requirió agregar un atributo adicional denominado “valor” el cual funcione como código para la elaboración de la HRU’s.

Tabla 2*Reclasificación de Usos de suelos.*

No	USO_CAPA	DESCRIPCIÓN CLC	Código proyecto
1	A. Comercio 1	Zonas comerciales	3
2	A. Comercio 2	Zonas comerciales	3
3	A. Comercio 3	Zonas comerciales	3
4	A. Dotacional 1	Áreas deportivas	6
5	A. Dotacional Recreativo	Áreas deportivas	5
6	A. Industrial	Zonas industriales	2
7	A. Multiple 1	Zonas comerciales	3
8	A. Multiple 2	Zonas industriales	2
9	A. Residencial 1	Tejido urbano continuo	1
10	A. Residencial 2	Tejido urbano continuo	1
11	A. Residencial 3	Tejido urbano continuo	1
12	A. Residencial 4	Tejido urbano continuo	1
13	RIO_DE_ORO	Cuerpos de agua	8
14	RIO_SURATA	Cuerpos de agua	8
15	ZONAS_VERDES	Pastos limpios	7
16	VIAS	Red vial	4

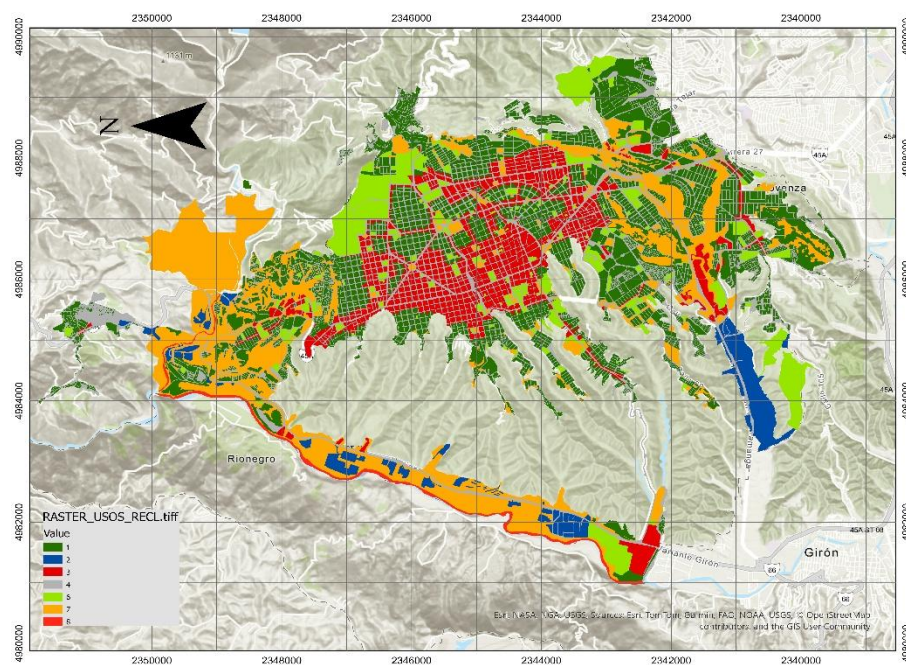
Fuente: Propia.

Esta reclasificación se llevó a cabo elaborando una tabla en Excel con la totalidad de registros de la tabla de atributos del uso de suelos, en donde se le asignó a cada registro la descripción CLC y un código para el proyecto, acto seguido, esta tabla se carga con el comando “join” para enlazar la nueva información al shapefile del uso de suelos.

Para realizar el proceso de las HRU's es necesario que las variables o parámetros sean archivos formato tipo ráster, por lo tanto, fue fundamental convertir el archivo shapefile del uso de suelos en ráster, este procedimiento se llevó a cabo en ArcMap aplicando la herramienta “Polygon To Ráster” de la caja - *Conversion Tools*, en este proceso de conversión se estableció que el tamaño del pixel fuera de 0.5mx0.5m con la finalidad que tuviese una adecuada representación de los polígonos - formato resultante .tiff.

Figura 16

Capa uso de suelos reclasificada en formato ráster.



Fuente: Propia - elaborada en Arcgis Pro.

10.1.4. Obtención y reclasificación mapa de pendientes - porcentual.

Con el modelo de elevación digital - MED descrito en el numeral 10.1.1, se procedió a extraer el mapa de pendientes de tipo porcentual mediante ArcMap, a este mapa se le realizó el proceso de reclasificación con la finalidad de refinar y simplificar agrupando las pendientes de acuerdo con la clasificación del terreno según la normativa invias, la Tabla 3 muestra los tipos de terreno junto con los rangos en grados y porcentuales respectivamente, adicionalmente se le agregó la columna “Categoría Proyecto” que corresponde a numerales que definirán los tipos de terreno en la creación de las HRU’s.

Tabla 3

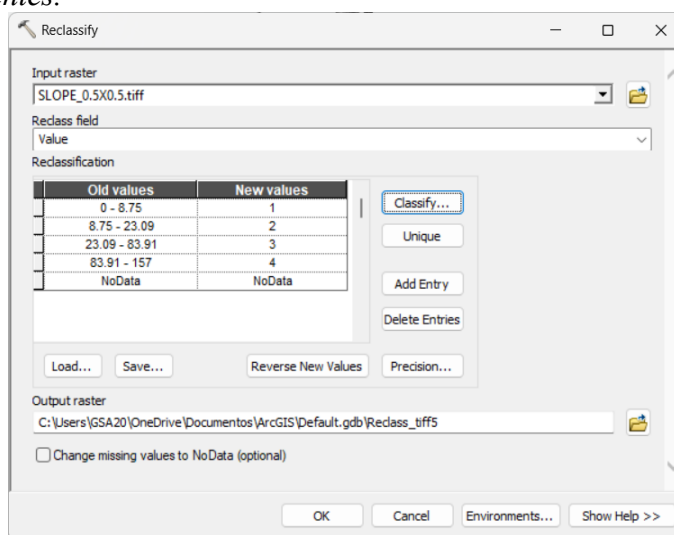
Clasificación de pendientes.

Tipo de Terreno	Pendiente Grados		Pendiente Porcentual	Categoría Proyecto
	De	A		
Plano	0	5	8.75%	1
Ondulado	6	13	23.09%	2
Montañoso	14	40	83.91%	3
Escarpado	40	-	83.91%	4

Fuente: Propia.

Figura 17

Reclasificación de pendientes.



Fuente: Propia.

El formato de los ráster que se visualizan en la Figura 18 es .tiff.

10.1.5. Creación de las Unidades de Respuesta hidrológica - HRU's.

Con los ráster del índice de humedad topográfica (reclasificados), uso de suelos y pendientes (reclasificadas), se procedió a realizar el recorte del primer y tercer ráster a la delimitación del archivo del uso de suelos, con la finalidad que las tres capas que harán parte de las HRU's sean similares en términos del área superficial que cubren, sus propiedades son las siguientes.

- Resolución de píxel: 0.5m x 0.5m.
- Sistema de coordenadas: MAGNA_SIRGAS_2018_Origen_Nacional

Las capas empleadas son las siguientes.

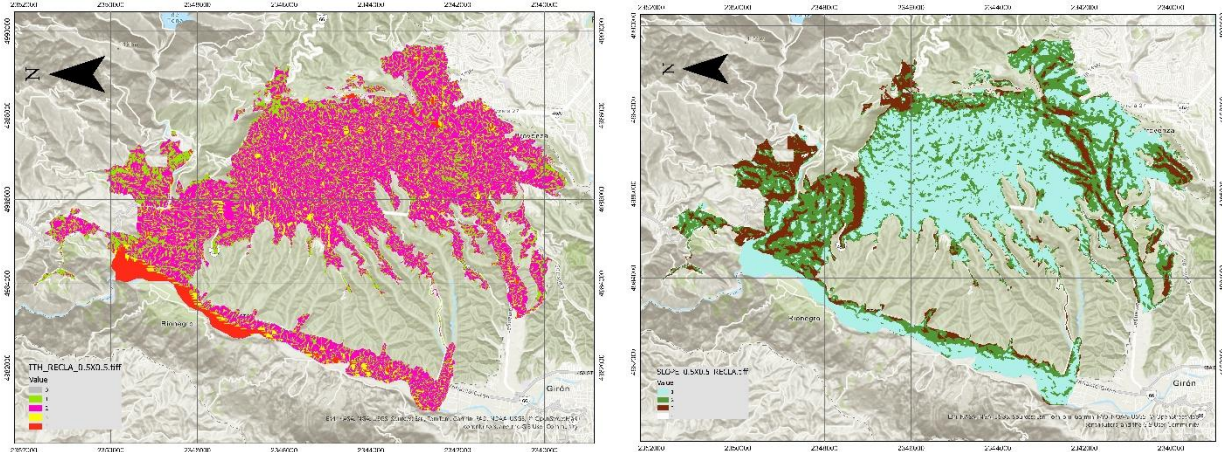
- Índice de humedad: IHT_RECLA_0.5X0.5.tiff
- Uso de suelos: RASTER_USOS_RECL.tiff
- Pendientes: SLOPE_0.5X0.5_RECLA.tiff

Nota: Es importante mencionar que el procedimiento para la creación de las HRU's fue desarrollado en base a consultas en la IA - Copilot.

- Variables o capas empleadas en la creación de las HRU's.

Figura 18
Recorte de ráster.

- Índice humedad topográfica - IHT.
- Mapa de pendientes – Porcentaje reclasificado.

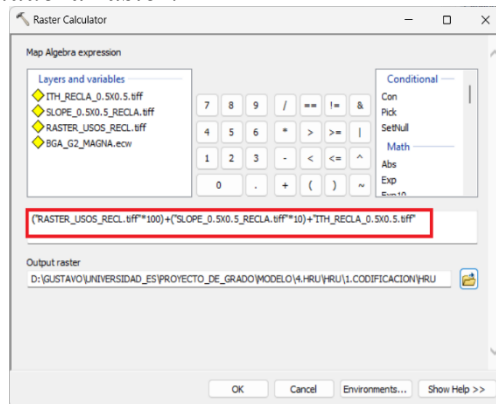


Fuente: Propia - elaborada en Arcgis Pro.

10.1.5.1. Creación de HRU's.

Las HRU's se crearon haciendo uso de la calculadora ráster (raster Calculator) del ArcMap, en donde se combinaron las tres capas de tipo ráster, mediante la siguiente formulación.

Figura 19
Creación de HRU's con la calculadora ráster.



Fuente: Propia.

La formulación está basada en establecer una codificación jerárquica que genere una combinación de forma inequívoca en un número único que esté contenido de la siguiente manera:

- Uso de suelos: expresado en posición de centenas
- Pendiente: expresado en posición de decenas
- Índice: expresado en posición de unidades

Tabla 4
Clases por variables para la formación de las HRU.

Uso de suelos		Pendiente.		Índice de humedad topográfica - IHT.	
Clase	Uso	Clase	Pendiente	Clase	Índice de humedad
1	Tejido urbano continuo	1	Plano	1	I.Bajo
2	Zonas industriales	2	Ondulado	2	I.Medio
3	Zonas comerciales	3	Montañoso	3	I.Medio alto
4	Red vial	4	Escarpado	4	I.Alto
5	Instalaciones recreativas				
6	Áreas deportivas				
7	Pastos limpios				
8	Cuerpos de agua				

Fuente: Propia.

Creado el ráster, se origina en la tabla de atributos una columna denominada “value” que contiene las diferentes combinaciones creadas a partir de las clases que contiene las variables que componen las HRU's.

Rowid	VALUE	COUNT
57	443	102
58	611	1284214
59	612	4810852
60	613	907997
61	614	175181
62	621	1781873
63	622	3478670
64	623	185886

Uso de suelos: 6
 Pendiente: 1
 Índice de humedad: 1

Nota: En el listado de uso de suelos clasificados en la Tabla 2, la clase No 5 no fue incluida ya que está cubierta por la No 6 como área deportiva, por lo tanto, la cantidad de usos clasificados será de siete (7), aunque la secuencia va hasta 8.

10.2. Variable climática y demográfica - OE1.

10.2.1. Variable climática - Intensidad de lluvias.

Los sistemas SUDS aplican los principios de diseño de los sistemas de drenaje convencionales para el transporte de caudales extremos de escorrentía asociados a caudales picos de un determinado periodo de retorno específico, dichos caudales son definidos mediante curvas de intensidad duración y frecuencia - IDF (MINISTERIO DE VIVIENDA, 2022).

10.2.1.1. Cálculo de curvas IDF por el método simplificado.

Para determinar a nivel espacial y establecer las intensidades en las diferentes HRU's, se propone en primer lugar construir las curvas IDF para cada una de las estaciones que se listan en la Tabla 6 y ubicadas como se muestra en Figura 21 bajo la propuesta del método simplificado del "Manual de drenajes de Carreteras del INVIAS". Este método subdivide el territorio colombiano en 4 regiones -

Figura 20, en donde a cada región se ha establecido una serie de parámetros Tabla 5 que son aplicables a una misma formulación general para obtener las curvas IDF.

$$i = \frac{a * T^b * M^d}{(t/60)^c}$$

i: Intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h).

T: Periodo de retorno, en años.

M: Precipitación máxima promedio anual en 24 h a nivel multianual

t: Duración de la lluvia, en minutos (min).

a,b,c,d: Parámetros de ajuste de la regresión. Estos parámetros fueron regionalizados como se presenta en la Figura 2.13, y sus valores se presentan en la Tabla 2.12.

Tabla 5

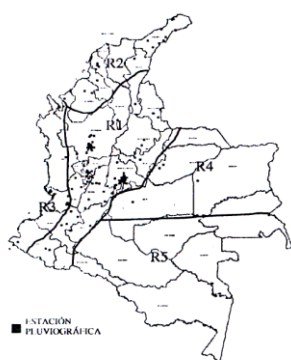
Parámetros ajustes de regresión.

REGIÓN	a	b	c	d
Andina (R1)	0.94	0.18	0.66	0.83
Caribe (R2)	24.85	0.22	0.50	0.10
Pacífico (R3)	13.92	0.19	0.58	0.20
Orinoquía (R4)	5.53	0.17	0.63	0.42

Fuente: Manual de drenajes de Carretera - INVIAS.

Figura 20

Regiones en Colombia para definición de parámetros a,b,c y d.



Fuente: Manual de drenajes de Carretera - INVIAS.

Ajustando la ecuación de acuerdo con las variables de la Tabla 5, queda

$$i = \frac{0.94 * T^{0.18} * M^{0.83}}{(t/60)^{0.66}}$$

La variable M de la ecuación se obtuvo para cada una de las estaciones a partir de datos históricos de precipitación diaria extraída de la base de datos pública del IDEAM en su portal web referente a estaciones pluviográficas y pluviométricas dentro y adyacente a la zona de estudio, teniendo en cuenta que todas las estaciones no contienen información hasta el año 2025 y que son de gran interés debido a su ubicación próxima al área de estudio se estimó una ventana de tiempo para trabajar desde noviembre de 1996 hasta enero del 2021 lo cual comprende un estimado de 8858 días, las estaciones seleccionadas se relacionan en la Tabla 6.

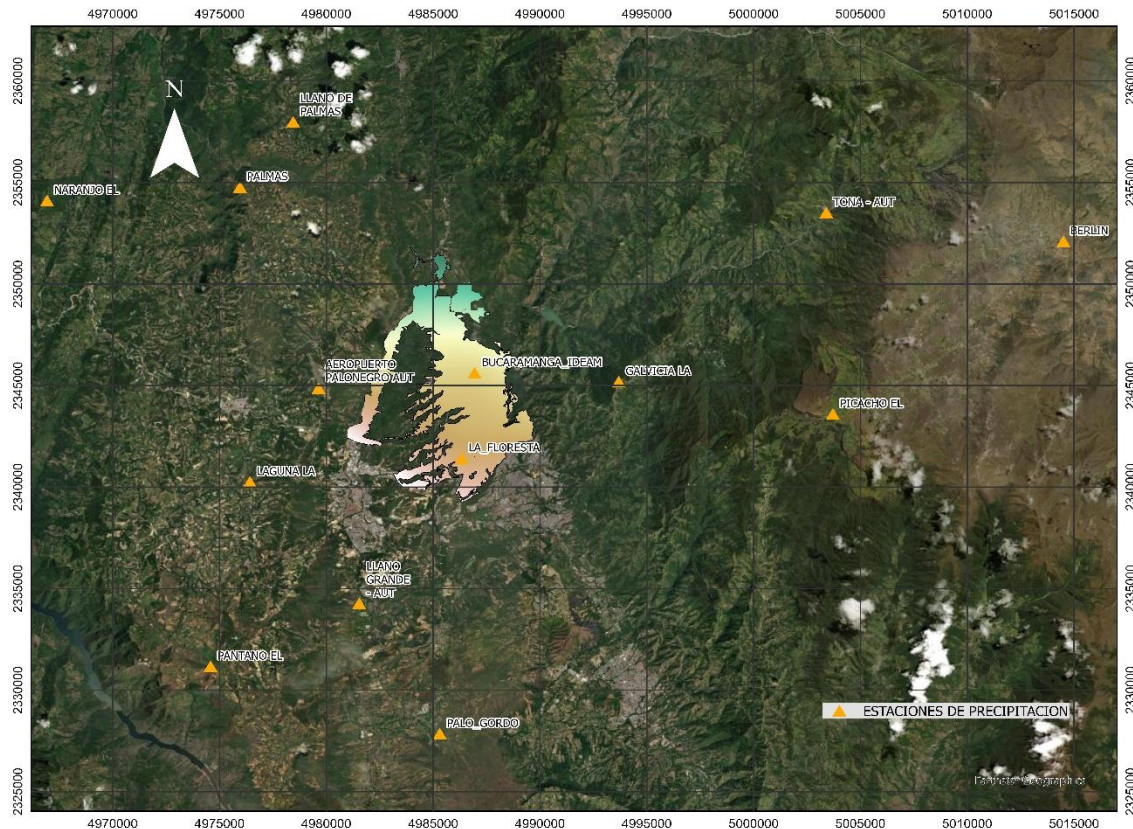
Tabla 6

Ubicación de estaciones.

No ESTACIÓN	MUNICIPIO	ESTACION	CÓDIGO	LONG	LAT
1	BUCARAMANGA	LA_FLORESTA	23190590	-73.12	7.09
2	BUCARAMANGA	BUCARAMANGA_IDEAM	23190830	-73.12	7.13
3	GIRON	PALO_GORDO	23190280	-73.13	6.97
4	GIRON	PANTANO EL	23190600	-73.23	7.00
5	GIRON	LLANO GRANDE - AUT	23195110	-73.17	7.03
6	LEBRIJA	LAGUNA LA	23190260	-73.21	7.08
7	LEBRIJA	PALMAS	23190380	-73.22	7.21
8	LEBRIJA	NARANJO EL	23190440	-73.30	7.21
9	LEBRIJA	AEROPUERTO PALONEGRO AUT	23195502	-73.18	7.12
10	TONA	TONA - AUT	23190130	-72.97	7.20
11	TONA	PICACHO EL	23190300	-72.97	7.11
12	TONA	BERLIN	37015020	-72.87	7.19
13	FLORIDABLANCA	GALVICIA LA	23190400	-73.06	7.12
14	RIONEGRO	LLANO DE PALMAS	23190350	-73.20	7.24

Fuente: Propia

Figura 21
Ubicación de estaciones de precipitación.



Fuente: Propia - elaborada en Arcgis Pro.

Adicionalmente, cabe mencionar que estos datos históricos presentan información faltante en algunos días, por lo tanto, para subsanar esta situación en cada una de las estaciones que tienen esta particularidad se optó por tomar datos de las estaciones cercanas ubicadas dentro de la misma área municipal promediando la precipitación para los días faltantes en la estación que requiere de datos. Una vez subsanada este inconveniente y aplicando el método simplificado se calcularon curvas IDF para periodos de retorno (T) 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años con tiempos de duración de lluvias (t) de 10 a 180 minutos, posteriormente se graficaron las curvas IDF de cada estación e incluídas en el apartado de anexos. Para analizar la implicación de las diferentes intensidades sobre las HRU se utilizarán los valores máximos de las curvas IDF que corresponde a un tiempo de lluvia de 10 minutos - Tabla 7.

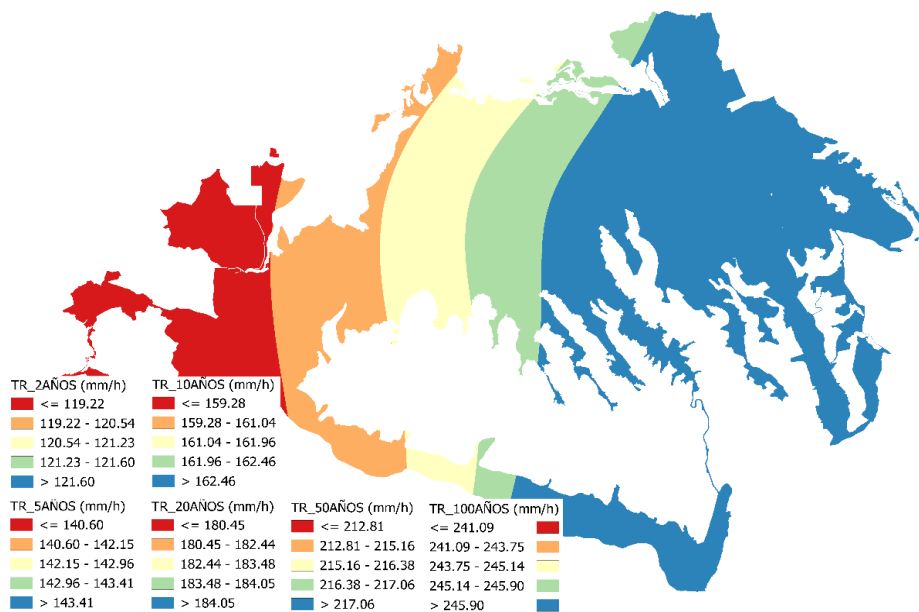
Tabla 7
Intensidad estaciones (mm/h).

No ESTACIÓN	Intensidad (mm/h) T=2años, t=10min	Intensidad (mm/h) T=5años, t=10min	Intensidad (mm/h) T=10años, t=10min	Intensidad (mm/h) T=20años, t=10min	Intensidad (mm/h) T=50años, t=10min	Intensidad (mm/h) T=100años, t=10min
1	122.40	144.35	163.53	185.26	218.475615	247.51
2	121.25	142.99	162.00	183.52	216.430925	245.19
3	122.20	144.11	163.26	184.96	218.122375	247.11
4	124.65	147.00	166.54	188.67	222.496250	252.06
5	113.84	134.25	152.09	172.30	203.196381	230.20
6	119.24	140.62	159.30	180.47	212.833552	241.12
7	137.95	162.68	184.30	208.79	246.227881	278.95
8	164.36	193.83	219.58	248.76	293.367740	332.35
9	128.54	151.59	171.73	194.55	229.435482	259.92
10	110.70	130.55	147.89	167.55	197.590306	223.85
11	80.32	94.72	107.30	121.56	143.360802	162.41
12	59.10	69.70	78.96	89.45	105.491176	119.51
13	126.99	149.76	169.66	192.21	226.672598	256.79
14	141.38	166.73	188.89	213.99	252.359905	285.89

Fuente: Propia.

Con los datos de intensidad máxima registrados en la Tabla 7 y la ubicación de las estaciones Tabla 6, se procedió a crear los mapas en formato ráster de las diferentes intensidades mediante interpolación, la visualización se realiza discretizando y agrupando por cuantil.

Figura 22
Interpolación de intensidades.



Fuente: Manual de drenajes de Carretera - INVIAS.

El mapa ráster de intensidad se procedió a cruzar con las HRU implementando la función “Zonal Statistics as Table” de ArcGIS PRO, donde se permite realizar el cruce entre el vector de las HRU con los diferentes ráster de intensidad, se escogió como variable del análisis estadístico el máximo.

Nota: El mapa de interpolación de intensidades - Figura 22, en donde la proporción de los resultados interpolados (colores) en el mapa es el mismo para cada uno de los TR, por lo tanto, se deja un mismo mapa con varias leyendas.

10.2.2. Variable demográfica - Población.

Esta variable se utilizó para analizar el componente social a nivel de las HRU, la información poblacional ha sido extraída de la base datos de ArcGIS Online, en donde está almacenada la capa “*MIUBASICO_NOESTANDARIZADO_EXTENDIDO_BUCARAMANGA*” en formato shapefile tipo polígono, dicha capa contiene variedad de información característica del municipio clasificada por manzanas, entre la información relevante al proyecto está la cantidad de habitantes. Luego, mediante herramientas de procesamiento SIG se calculó el área de cada polígono en hectáreas con lo que se determinó la densidad poblacional en las diferentes manzanas quedando registradas en la tabla de atributos.

Con los datos de densidad poblacional de la tabla de atributos del shapefile se procedió a calcular medidas de tendencia para determinar el comportamiento de esta distribución, obteniéndose: media aritmética: 589.51, desviación estándar: 453.98, coeficiente de variación - CV: 73.81%, lo anterior, indica que se presenta una alta dispersión en la información. Pero debido a la cantidad de datos y el análisis que se desea desarrollar se procedió a realizar el análisis estadístico mediante datos agrupados.

- ✓ N Datos: 3729
- ✓ Mínima densidad: 1.31
- ✓ Máxima densidad: 3630.82
- ✓ Rango: 3629.51
- ✓ Intervalos calculados: 13

- ✓ Amplitud: 280
- ✓ Intervalos aplicados: 7

Empleando la formulación de Sturges se obtuvieron 13 intervalos para analizar la información como datos agrupados, pero debido a que los datos de la población se analizarán de manera cualitativa en categorías se propone emplear 7 intervalos en vez de 13, ya que con esta cantidad de intervalos la información es más tratable, en los primeros 6 intervalos la amplitud corresponde a la calculada, pero en el último intervalo la amplitud es mayor (aproximadamente 7 veces) ya que es donde se ubican los datos más dispersos.

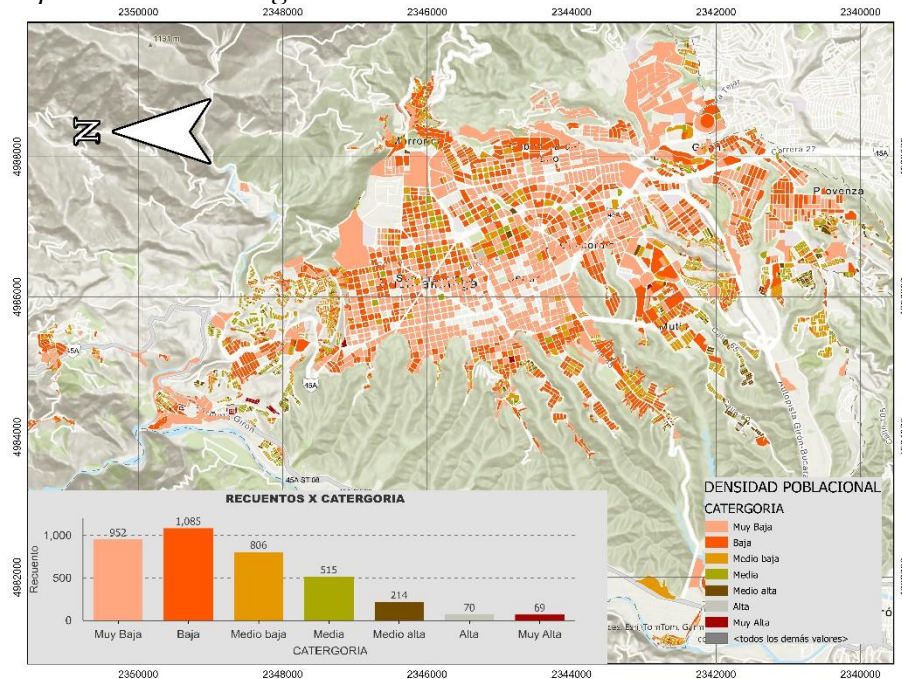
Tabla 8
Categorías densidad poblacional.

VAR_ CAT	Categoría_ Densidad	DE	A	Marca de clase	f. absoluta	f. relativa	f. relativa AC	Varianza	Dens x Categ (hab/Ha)
1	Muy Baja	0.00	280.00	140.00	953	25.56%	25.56%	53786.08	118.00
2	Baja	280.00	560.00	420.00	1089	29.20%	54.76%	9328.02	401.00
3	Medio baja	560.00	840.00	700.00	812	21.78%	76.54%	2235.22	671.00
4	Media	840.00	1120.00	980.00	519	13.92%	90.45%	20240.93	956.00
5	Medio alta	1120.00	1400.00	1260.00	216	5.79%	96.25%	25338.33	1237.00
6	Alta	1400.00	1680.00	1540.00	71	1.90%	98.15%	16874.88	1486.00
7	Muy Alta	1680.00	3630.82	2655.41	69	1.85%	100.00%	78292.54	2278.00
TOTAL					3729	100%		206096.01	

Fuente: Propia.

Con estos datos agrupados se calcularon medidas de tendencia central y dispersión, como: media aritmética: 598.7, desviación estándar: 453.98, coeficiente de variación: 75.83%, se observa un comportamiento de las medidas de tendencia cercano a los datos no agrupados, ahora, los primeros 6 intervalos la distribución de los datos contiene el 98.15% de la información.

Figura 23
Mapa densidad poblacional - categorizado.



Fuente: Propia - elaborada en Arcgis Pro.

Con la densidad poblacional clasificada en categorías y condensada en un archivo tipo vector - shapefile se procede a cruzar esta capa con las diferentes clasificaciones resultantes de las HRU's empleando la herramienta "Intersect" en el ArcMap, el resultado de este proceso arroja una tabla en formato .dbf.

10.3. Construcción de la matriz multicriterio de pesos lineales para selección de sistemas SUDS.

10.3.1. Asignación de grados de importancia por niveles para las variables que componen las HRU – Pesos ponderados OE2 (parcial).

Para establecer los grados de importancia se implementaron dos niveles, el primer nivel se procedió a clasificar la importancia de cada clase en cada una de las capas, en el segundo nivel corresponde de manera general a la importancia que tiene cada capa dentro de las HRU's, estas

clasificaciones están basadas en priorizar los aspectos para la generación de escorrentía que con lleva a las inundaciones.

10.3.1.1. Grado de importancia - Nivel 1, por clases en cada variable.

En este nivel se clasificará el grado de importancia dependiendo el riesgo que tiene cada una de las clases dentro de cada variable Tabla 4. Con la finalidad de acotar la información se procedió simplificar a tres tipos de clasificaciones el riesgo de cada clase en cada variable, asignando; Bajo: 1, Medio: 2, Alto: 3, en donde bajo es menor importancia y alto es mayor importancia respectivamente. Esta clasificación se hace al conocimiento que tiene el autor con respecto al tema.

- **Uso de suelo:** Esta variable determina el tipo de permeabilidad que tiene la cobertura del suelo en la zona de estudio, relacionada directamente con la infiltración y por consiguiente un factor fundamental para la generación de escorrentía (Alfaro et al., 2020). Por lo tanto, las zonas que presentan áreas con coberturas impermeables como concretos, asfaltos, etc, se les asignará un valor de 3, ya que la infiltración es muy baja o nula. Las zonas recreativas o de tipo deportivo se les asigna un valor de 2, ya que estas áreas tienden a ser mixtas donde presentan coberturas impermeables como permeables en cierto grado de proporción. Por último, las zonas de pastos limpios se asigna un valor de 1, debido a que son espacios naturales donde la tendencia a la infiltración o permeabilidad es alta.

Tabla 9

Clasificación importancia uso de suelos.

Clase	Uso	Grado de importancia
1	Tejido urbano continuo	3
2	Zonas industriales	3
3	Zonas comerciales	3
4	Red vial	3
5	Instalaciones recreativas	2
6	Áreas deportivas	2
7	Pastos limpios	1
8	Cuerpos de agua	0

Fuente: Propia.

Nota: dentro de las clases que se asociaron a los usos de suelos se encuentran los cuerpos de agua y está numerada en la posición 8, dicha clase no se tuvo en cuenta para establecer los grados de importancia, por lo tanto, se le dio un valor de cero y no hará parte del conjunto de HRU en la creación de la matriz multicriterio.

- **Pendiente:** Esta variable es fundamental para la generación de escorrentía permitiendo el movimiento del agua sobre la superficie del suelo como flujo libre accionado por la gravedad, por lo tanto, las pendientes altas ocasionan que el flujo se produzca con mayor velocidad lo que conlleva a la reducción de la infiltración en el suelo (Alvarado Batres & Barahona-Palomo, 2016), ahora, en el contexto de las clases de esta variable se le asignará un valor de 3 al tipo montañoso y escarpado, ya que comprenden pendientes mayores al 23% -Tabla 3, la clase de tipo ondulado se le asigna un valor de 2 siendo un tipo de pendiente moderada, por último, la pendiente plana se clasifica con un valor de 1 en donde el flujo del agua es más lento lo que permite infiltraciones mayores.

Tabla 10

Clasificación importancia pendientes.

Clase	Pendiente	Grado de importancia
1	Plano	1
2	Ondulado	2
3	Montañoso	3
4	Escarpado	3

Fuente: Propia.

- **Índice de humedad topográfica:** Se basa en la identificación espacial de la acumulación del agua sobre la superficie del suelo, en donde los altos índice están relacionados con las bajas pendientes o las zonas de llanura y, los bajos índices corresponden a pendientes altas donde hay movimiento de escorrentía y baja acumulación de agua (Roa Lobo & Ulrich, 2012), por consiguiente, los índices bajos se clasifica como 1, los índices identificados como medio y medio alto se le asigna un valor de 2 y la clase de índice alto que identifica los puntos de mayor acumulación de agua lo cual tiende a provocar afectaciones por inundaciones se clasifica con un valor de 3.

Tabla 11

Clasificación importancia índice de humedad topográfica.

Clase	Índice de humedad	Grado de importancia
1	I.Bajo	1
2	I.Medio	2
3	I.Medio alto	2
4	I.Alto	3

Fuente: Propia.

10.3.1.2. Grado de importancia - Nivel 2, global.

Para establecer el nivel de importancia entre las tres variables que conforman las HRU (Uso de suelos, Pendiente, Índice de humedad topográfica) se implementó la metodología de matriz Multicriterio de Jerarquía Analítica (AHP) creada por Thomas L. Saaty, este método contiene una escala de grados de importancia de 1 a 9, donde el menor valor es de baja importancia y el mayor es la más alta importancia (De Luca et al., 2018).

Tabla 12

Grados de importancia método Saaty.

Grado de importancia	Definición
1	De igual importancia
2	Débilmente importante
3	Moderadamente importante
4	Un poco más moderadamente
5	Fuertemente importante
6	Un poco más fuertemente
7	Muy fuertemente
8	Demasiado muy fuertemente
9	Extremadamente importante

Fuente: Adaptada de (De Luca et al., 2018).

Consideraciones para el análisis:

- El uso de suelos es un poco más moderadamente importante que la pendiente (valor: 4)
- El uso de suelos es moderadamente importante que el índice de humedad topográfica (valor: 3)
- La pendiente es débilmente importante que el índice de humedad topográfica (valor: 2)

De acuerdo, con las anteriores consideraciones se construye la matriz (AHP).

Tabla 13
Matriz de Saaty.

	USO DE SUELOS	PENDIENTE	IHT	W(i)	C(i)	LAMDAi
USO DE SUELOS	1	4	3	2.29	63.01%	1.00
PENDIENTE	1/4	1	2	0.79	21.84%	1.20
IHT	1/3	1/2	1	0.55	15.15%	0.91
P(i)	1.58	5.50	6.00	3.63	100.00%	3.11 λ_{max}

Fuente: Propia - adaptada.

Cálculo de la razón de consistencia.

- Índice de consistencia geométrica - IC.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \rightarrow Ci = \frac{3.11 - 3}{3 - 1} \rightarrow Ci = 0.054$$

- Índice de consistencia aleatorio

$$Rci = \frac{1,98 * (n - 2)}{n} \rightarrow Rci = \frac{1,98 * (3 - 2)}{3} \rightarrow Rci = 0.66$$

- Razón de consistencia.

$$RC = \frac{IC}{IA} \rightarrow RC = \frac{0.054}{0.66} \rightarrow RC = 0.082$$

Se obtiene una razón de consistencia de 0.082, que según Saaty autor del método recomienda valores inferiores de 0.1 para un procedimiento consistente (Riaño-Luna & Palomino-Leiva, 2015), por lo tanto, el análisis se encuentra dentro de estos parámetros y los pesos de importancia son: uso de suelos 63.01%, Pendiente 21.84% e Índice de humedad topográfica: 15.15%.

10.3.2. Procedimiento para la construcción de la matriz de pesos lineales - OE3 (parcial).

Paso 1: Con estas clasificaciones del numeral 10.3.1.1 se procede a calcular los grados de importancia de las diferentes HRU's, este procedimiento consiste en la suma de los diferentes grados de cada variable que la compone, HRU=U+P+IHT, donde: U: uso de suelos, P: pendiente, IHT: índice de humedad topográfica, el rango de oscilación de las HRU en el nivel 1 va de 3 a 9.

Paso 2: calcular el promedio ponderado en cada HRU entre las variables uso de suelos, pendiente e índice de humedad topográfica de acuerdo con los grados de importancia de cada clase determinados en el numeral 10.3.1.1 y el peso de importancia general 10.3.1.2, $HRU_p = (U * W_U) + (P * W_P) + (IHT * W_{IHT})$, el rango de oscilación de las HRU_p en el nivel 2 va de 1 a 3.

Paso 3: se crean cinco (5) niveles de importancia para categorizar los diferentes promedios ponderados de las HRU's del paso 2, en este paso se obtiene la distribución espacial de los niveles de riesgo por los efectos de inundaciones, por lo tanto, esto permitirá sectorizar y priorizar las zonas donde y definir los tipos de sistemas SUDS que requieren estas categorías (Baja importancia, Importante, Mediana importancia, Alta importancia, Extremadamente importante).

Paso 4: Cada categoría del paso 3 contiene un conjunto de HRU's, de donde se selecciona una HRU representativa en términos de uso de suelo, pendiente e índice de humedad topográfica, esta HRU corresponde al promedio de los valores ponderados HRU_p de cada conjunto, una vez seleccionada se procede a normalizar entre sus componentes para actuar como peso de ponderación dentro de la matriz multicriterio en la elección de las diferentes alternativas para los sistemas SUDS.

Paso 5: Cada uno de los sistemas a evaluar en las diferentes categorías se deben puntuar con respecto al uso de suelo, pendiente e índice de humedad topográfica de la HRU representativa de cada conjunto, con una escala adoptada de 1: no idóneo, 2: idóneo bajo, 3: idóneo, 4: medianamente idóneo y 5: muy idóneo. Para asignar esta puntuación se consultó información especializada junto con herramientas de inteligencia artificial de la plataforma de Google Gemini en donde se extrajo consideraciones de la importancia que tiene cada variable que conforma la HRU con respecto a los sistemas SUDS, se agrega la Tabla 23 con esta información en la sección de anexos.

Paso 6: Con la implicación de la variable climática de tipo intensidad, se procedió a normalizar linealmente entre el máximo y mínimo valor de la distribución de datos de todas las intensidades de las HRU's, luego a cada grupo de las cinco (5) categorías de importancia del paso

3 se extrajo el máximo valor por cada intensidad, y luego se expresó en términos porcentuales bajo la normalización aplicada.

Paso 7: Para construir la matriz multicriterio en donde se incluyó la variable climática de intensidad destinada a la selección de los SUDS en cada una de las categorías del paso 3, se asoció al conjunto de sistemas descritos en el numeral 8.4 los periodos de retorno para los cuales son implementados, algunos datos del periodo de retorno fueron tomados del documento técnico de soporte SUDS del 2011 de la secretaría de ambiente de la Alcaldía Mayor de Bogotá, junto con información consultada en aplicaciones de inteligencia artificial basada en la búsqueda de información especializada del tema de estudio. Techos verdes: 2, 5 años, Fachadas verdes: 2, 5 años, Tanques de almacenamiento: 10, 20 y 50 años, Alcorques inundables: 2 años, Humedales: 10 y 20 años, Cunetas verdes: 2, 5 y 10 años, Cuencas secas: 20, 50 y 100 años, Zonas inundables: 100 años, Zanjas de infiltración: 2 años, Tanques de infiltración: 5, 10 y 20 años, Pavimentos permeables: 2 y 5 años, Jardín microcuenca: 2 años, Jardín de lluvia: 2 años, Pozo de infiltración: 2 años, Zanja – bordo: 2 y 5 años, Filtros: 2 años.

Paso 8: Esquema matriz multicriterio.

		PESOS PONDERADOS HRU's U+P+IHT	TOTAL
PERIODOS DE RETORNO POR SISTEMA	LISTADO DE SISTEMAS SUDS EVALUADOS	PUNTUACIONES DE IDONEIDAD PARA CADA SISTEMAS SUDS EN LAS HRU's	RESULTADO EVALUACIÓN SISTEMA SUDS

El total es la suma de la multiplicación entre la puntuación y el peso ponderado de cada variable de la HRU.

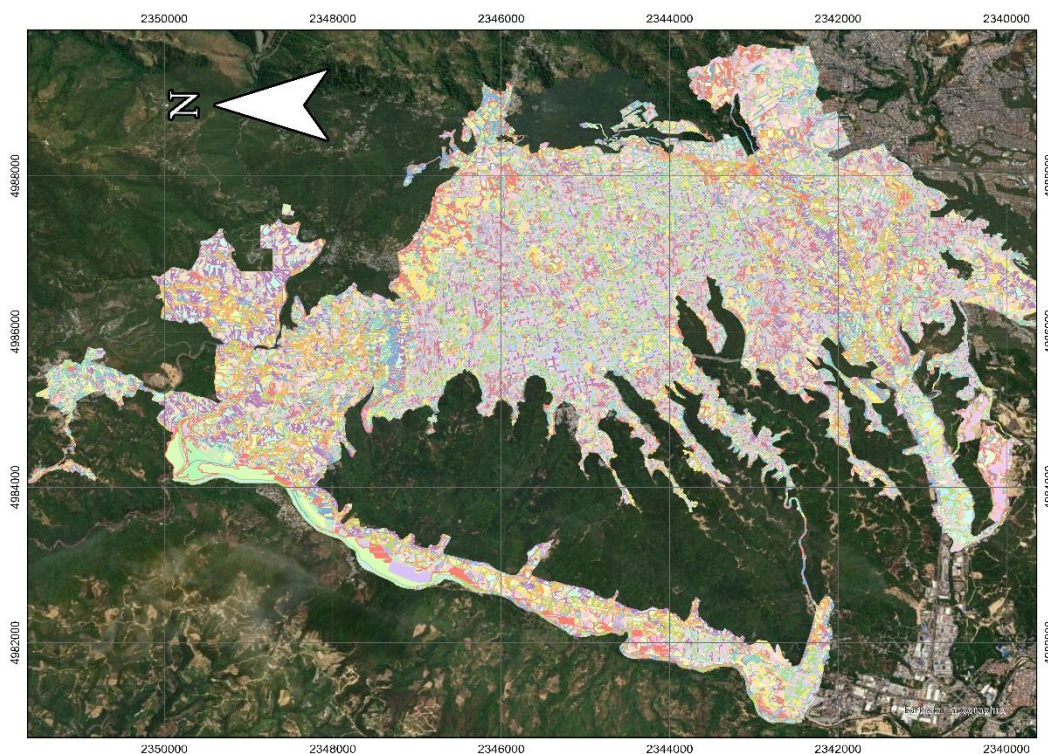
Total puntuación ponderada del sistema SUDS: (Puntuación uso de suelos*peso uso de suelos) + (puntuación pendiente*peso pendiente) + (puntuación índice*peso índice).

11. Resultados.

11.1. Unidades de Respuesta Hidrológica - HRU's.

De acuerdo con el procedimiento del numeral 10.1.5.1, se obtuvo un total de 2.669.346 polígonos agrupados en 100 clasificaciones de HRU's.

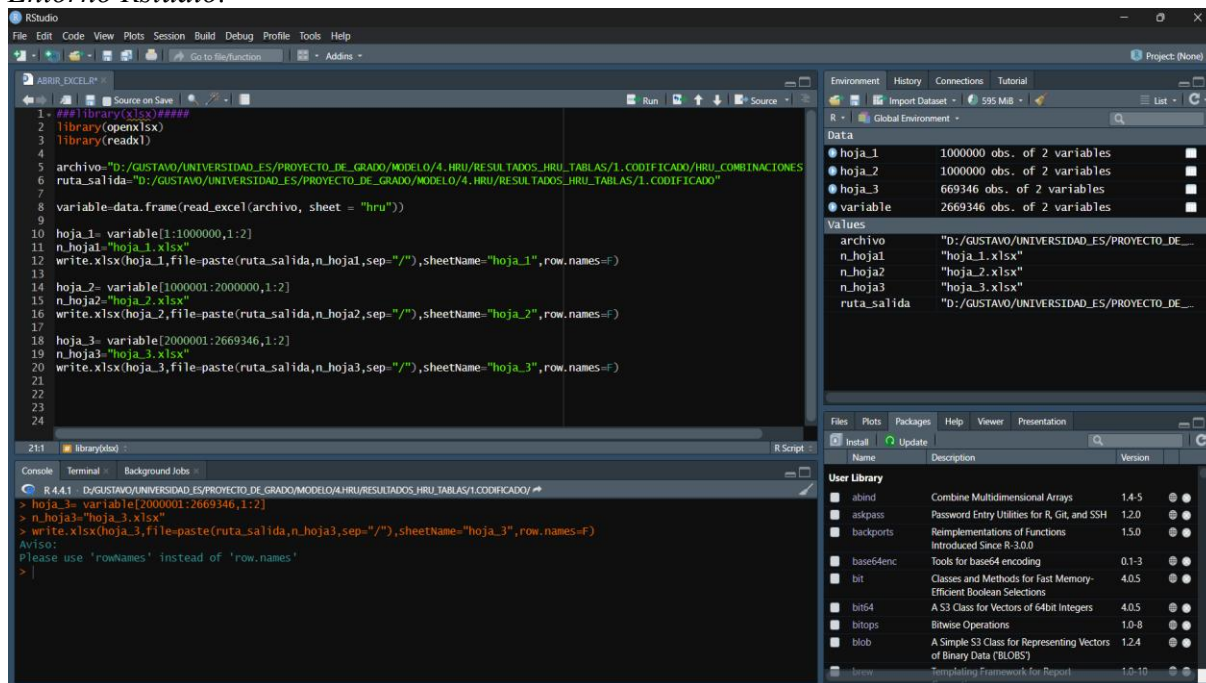
Figura 24
Mapa HRU - Combinaciones.



Fuente: Propia - elaborada en Arcgis Pro.

Teniendo en cuenta que cada registro en la tabla de atributos del archivo vectorial de las HRU's corresponde a un polígono, la totalidad de registros resultantes supera el límite permitido dentro de una hoja de Excel para visualización y análisis de resultados, por lo tanto, se requirió emplear una alternativa diferente para acceder a la información del archivo, en este caso se optó por Rstudio ya que esta plataforma de programación no presenta límites en la apertura de información de hojas de cálculo, posteriormente, se procedió a dividir el registro total en dos archivos de 1.000.000 registros y un tercero en 669.346 registros.

Figura 25
Entorno Rstudio.



Fuente: Propia.

La Tabla 15 registra las diferentes combinaciones de las HRU's resultantes de las 100 clasificaciones junto con la cantidad de polígonos que contiene y el área superficial por cada HRU, el área total de análisis es de 35.29Km².

11.2. Clasificación de categorías de importancia para la construcción de matriz de pesos lineales.

En la Tabla 14 se listan las categorías del paso 3 - numeral 10.3, en donde se agruparon las 100 clasificaciones de HRU, a cada una de estas categorías se les realizó un proceso estadístico independiente dentro del conjunto de datos que abarca cada una con la finalidad de establecer la idoneidad de emplear el promedio como valor representativo de cada categoría, mencionado en el paso 4, los parámetros estadísticos calculados fueron la media aritmética junto con la desviación estándar muestral para obtener el coeficiente de variación como indicador determinante.

El total de datos de las cinco (5) categorías abarcan 87 clasificaciones, esto significa que no se tuvieron en cuenta 13 clasificaciones de HRU conformadas por usos de suelos de tipo “cuerpos de agua”, esta anotación está mencionada en el numeral 10.3.1.1

Tabla 14

Categorías de importancia para clasificación de HRU.

CATEGORIAS	ÁREA (Ha)	INTERVALOS HRU _p		DATOS	Media	Desv	CV
Baja importancia	24.99	0	1	2	1.00	0.00	0.00%
Importante	651.60	1	1.5	8	1.30	0.12	9.06%
Mediana importancia	451.85	1.5	2	13	1.74	0.17	9.68%
Alta importancia	1562.22	2	2.5	26	2.34	0.13	5.47%
Extremadamente importante	799.32	2.5	3	38	2.76	0.13	4.77%
Total	3489.97			87			

Fuente: Propia

Las 87 clasificaciones agrupadas en cinco (5) categorías abarcan un área superficial de 3489.97Ha (34.9Km²), por lo tanto, las 13 categorías no incluidas suman 38.64Ha (0.39Km²). En cuanto a los parámetros estadísticos calculados el coeficiente de variación de cada una de las categorías se encuentra por debajo del 30%, esto indica que el promedio es una buena medida representativa de cada conjunto.

En la Tabla 15 se asoció a cada una de las HRU resultantes la categoría del grado de importancia a la que pertenece - Tabla 14, estas diferentes categorías fueron ubicadas en espacialmente para identificar su posicionamiento ver Figura 26.

Tabla 15

Listado de HRU's con grados de importancia – Pesos Ponderados.

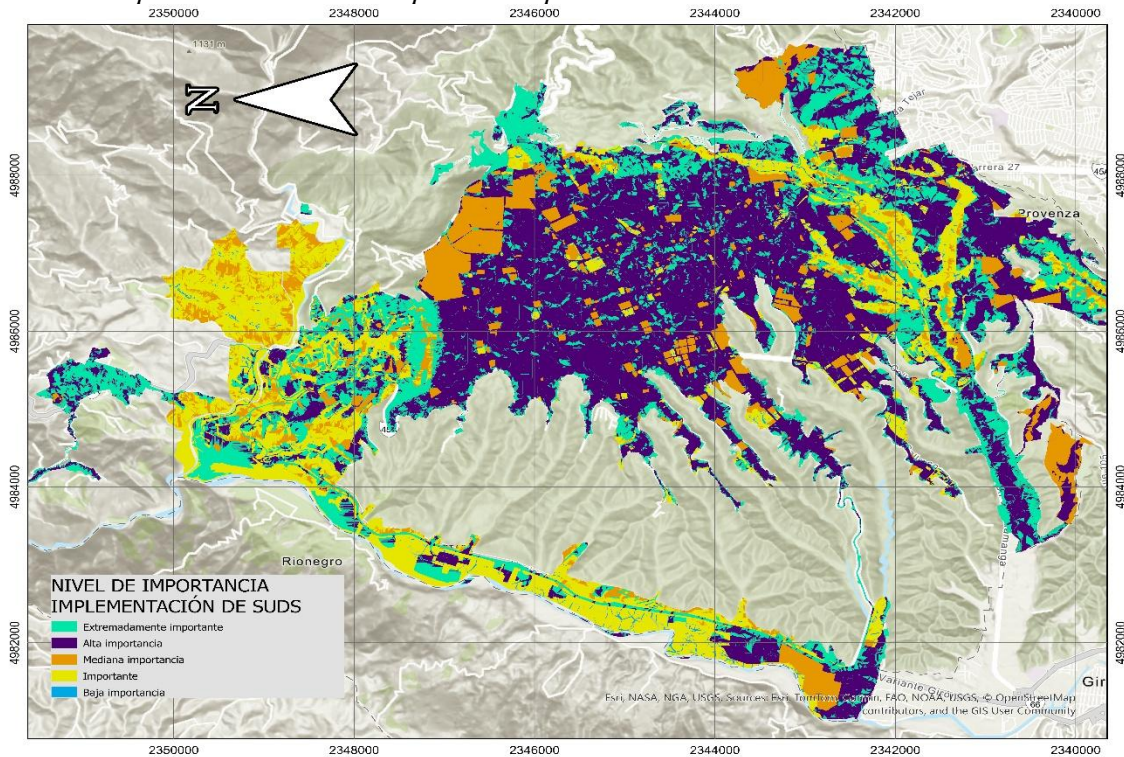
No HRU	gridcode	CLASIFICACIÓN HRU's	CANT. POLY	ÁREA (Km ²)	Grado de importancia 1				Grado de importancia 2				CATEGORÍAS DE IMPORTANCIA
					USO	PEND	IHT	SUMA GI 1	USO	PEND	IHT	SUMA GI 2	
	100								63.01%	21.84%	15.15%		
8	112	Tejido urbano continuo - Plano - I.Medio	140332	3.35	3	1	2	6	1.89	0.22	0.30	2.41	Alta importancia
6	412	Red vial - Plano - I.Medio	142991	2.94	3	1	2	6	1.89	0.22	0.30	2.41	Alta importancia
34	312	Zonas comerciales - Plano - I.Medio	108812	2.38	3	1	2	6	1.89	0.22	0.30	2.41	Alta importancia
9	122	Tejido urbano continuo - Ondulado - I.Medio	151350	2.22	3	2	2	7	1.89	0.44	0.30	2.63	Extremadamente importante
51	722	Pastos limpios - Ondulado - I.Medio	130742	2.18	1	2	2	5	0.63	0.44	0.30	1.37	Importante
4	422	Red vial - Ondulado - I.Medio	116594	1.71	3	2	2	7	1.89	0.44	0.30	2.63	Extremadamente importante
55	732	Pastos limpios - Montañoso - I.Medio	104168	1.32	1	3	2	6	0.63	0.66	0.30	1.59	Mediana importancia
52	731	Pastos limpios - Montañoso - I.Bajo	53430	1.22	1	3	1	5	0.63	0.66	0.15	1.44	Importante
19	612	Áreas deportivas - Plano - I.Medio	54935	1.20	2	1	2	5	1.26	0.22	0.30	1.78	Mediana importancia
10	121	Tejido urbano continuo - Ondulado - I.Bajo	96830	1.08	3	2	1	6	1.89	0.44	0.15	2.48	Alta importancia
56	712	Pastos limpios - Plano - I.Medio	61677	0.97	1	1	2	4	0.63	0.22	0.30	1.15	Importante
53	721	Pastos limpios - Ondulado - I.Bajo	84134	0.92	1	2	1	4	0.63	0.44	0.15	1.22	Importante
18	622	Áreas deportivas - Ondulado - I.Medio	55355	0.87	2	2	2	6	1.26	0.44	0.30	2.00	Mediana importancia
1	421	Red vial - Ondulado - I.Bajo	69742	0.79	3	2	1	6	1.89	0.44	0.15	2.48	Alta importancia
7	111	Tejido urbano continuo - Plano - I.Bajo	76501	0.76	3	1	1	5	1.89	0.22	0.15	2.26	Alta importancia
17	113	Tejido urbano continuo - Plano - I.Medio alto	104555	0.67	3	1	2	6	1.89	0.22	0.30	2.41	Alta importancia
3	411	Red vial - Plano - I.Bajo	75366	0.67	3	1	1	5	1.89	0.22	0.15	2.26	Alta importancia
13	132	Tejido urbano continuo - Montañoso - I.Medio	49639	0.62	3	3	2	8	1.89	0.66	0.30	2.85	Extremadamente importante
5	413	Red vial - Plano - I.Medio alto	105988	0.62	3	1	2	6	1.89	0.22	0.30	2.41	Alta importancia
59	714	Pastos limpios - Plano - I.Alto	9398	0.59	1	1	3	5	0.63	0.22	0.45	1.30	Importante
11	131	Tejido urbano continuo - Montañoso - I.Bajo	25914	0.55	3	3	1	7	1.89	0.66	0.15	2.70	Extremadamente importante
29	322	Zonas comerciales - Ondulado - I.Medio	37804	0.52	3	2	2	7	1.89	0.44	0.30	2.63	Extremadamente importante
33	313	Zonas comerciales - Plano - I.Medio alto	89781	0.52	3	1	2	6	1.89	0.22	0.30	2.41	Alta importancia
37	311	Zonas comerciales - Plano - I.Bajo	54515	0.51	3	1	1	5	1.89	0.22	0.15	2.26	Alta importancia
57	713	Pastos limpios - Plano - I.Medio alto	51194	0.47	1	1	2	4	0.63	0.22	0.30	1.15	Importante
20	621	Áreas deportivas - Ondulado - I.Bajo	34143	0.45	2	2	1	5	1.26	0.44	0.15	1.85	Mediana importancia
12	432	Red vial - Montañoso - I.Medio	39381	0.43	3	3	2	8	1.89	0.66	0.30	2.85	Extremadamente importante
44	212	Zonas industriales - Plano - I.Medio	25696	0.38	3	1	2	6	1.89	0.22	0.30	2.41	Alta importancia
2	431	Red vial - Montañoso - I.Bajo	24227	0.37	3	3	1	7	1.89	0.66	0.15	2.70	Extremadamente importante
41	222	Zonas industriales - Ondulado - I.Medio	19577	0.36	3	2	2	7	1.89	0.44	0.30	2.63	Extremadamente importante
21	611	Áreas deportivas - Plano - I.Bajo	30383	0.32	2	1	1	4	1.26	0.22	0.15	1.63	Mediana importancia
35	114	Tejido urbano continuo - Plano - I.Alto	14268	0.29	3	1	3	7	1.89	0.22	0.45	2.56	Extremadamente importante
58	711	Pastos limpios - Plano - I.Bajo	28106	0.25	1	1	1	3	0.63	0.22	0.15	1.00	Baja importancia
31	321	Zonas comerciales - Ondulado - I.Bajo	21299	0.24	3	2	1	6	1.89	0.44	0.15	2.48	Alta importancia
22	613	Áreas deportivas - Plano - I.Medio alto	41957	0.23	2	1	2	5	1.26	0.22	0.30	1.78	Mediana importancia
63	814	Cuerpos de agua - Plano - I.Alto	861	0.20	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	
45	213	Zonas industriales - Plano - I.Medio alto	25081	0.19	3	1	2	6	1.89	0.22	0.30	2.41	Alta importancia
32	414	Red vial - Plano - I.Alto	15641	0.18	3	1	3	7	1.89	0.22	0.45	2.56	Extremadamente importante
24	632	Áreas deportivas - Montañoso - I.Medio	12753	0.17	2	3	2	7	1.26	0.66	0.30	2.22	Alta importancia
23	631	Áreas deportivas - Montañoso - I.Bajo	5522	0.16	2	3	1	6	1.26	0.66	0.15	2.07	Alta importancia
64	214	Zonas industriales - Plano - I.Alto	3408	0.14	3	1	3	7	1.89	0.22	0.45	2.56	Extremadamente importante
49	723	Pastos limpios - Ondulado - I.Medio alto	47444	0.14	1	2	2	5	0.63	0.44	0.30	1.37	Importante
42	221	Zonas industriales - Ondulado - I.Bajo	13758	0.12	3	2	1	6	1.89	0.44	0.15	2.48	Alta importancia
15	123	Tejido urbano continuo - Ondulado - I.Medio alto	41080	0.11	3	2	2	7	1.89	0.44	0.30	2.63	Extremadamente importante
16	423	Red vial - Ondulado - I.Medio alto	36348	0.10	3	2	2	7	1.89	0.44	0.30	2.63	Extremadamente importante
36	314	Zonas comerciales - Plano - I.Alto	13651	0.08	3	1	3	7	1.89	0.22	0.45	2.56	Extremadamente importante
46	232	Zonas industriales - Montañoso - I.Medio	4842	0.08	3	3	2	8	1.89	0.66	0.30	2.85	Extremadamente importante

Diseño de una matriz multicriterio con variables espaciales para evaluar SUDS en la gestión del riesgo de ... 75

43	211	Zonas industriales - Plano - I.Bajo	8302	0.08	3	1	1	5	1.89	0.22	0.15	2.26	Alta importancia
72	812	Cuerpos de agua - Plano - I.Medio	3153	0.07	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	
62	813	Cuerpos de agua - Plano - I.Medio alto	2811	0.06	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	
48	231	Zonas industriales - Montañoso - I.Bajo	4227	0.05	3	3	1	7	1.89	0.66	0.15	2.70	Extremadamente importante
26	623	Áreas deportivas - Ondulado - I.Medio alto	15451	0.05	2	2	2	6	1.26	0.44	0.30	2.00	Mediana importancia
76	614	Áreas deportivas - Plano - I.Alto	5946	0.04	2	1	3	6	1.26	0.22	0.45	1.93	Mediana importancia
83	331	Zonas comerciales - Montañoso - I.Bajo	1884	0.04	3	3	1	7	1.89	0.66	0.15	2.70	Extremadamente importante
82	332	Zonas comerciales - Montañoso - I.Medio	3654	0.03	3	3	2	8	1.89	0.66	0.30	2.85	Extremadamente importante
54	733	Pastos limpios - Montañoso - I.Medio alto	12554	0.03	1	3	2	6	0.63	0.66	0.30	1.59	Mediana importancia
40	223	Zonas industriales - Ondulado - I.Medio alto	12119	0.03	3	2	2	7	1.89	0.44	0.30	2.63	Extremadamente importante
30	323	Zonas comerciales - Ondulado - I.Medio alto	10939	0.02	3	2	2	7	1.89	0.44	0.30	2.63	Extremadamente importante
71	741	Pastos limpios - Escarpado - I.Bajo	140	0.02	1	3	1	5	0.63	0.66	0.15	1.44	Importante
75	811	Cuerpos de agua - Plano - I.Bajo	1174	0.02	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	
68	822	Cuerpos de agua - Ondulado - I.Medio	987	0.02	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	
14	133	Tejido urbano continuo - Montañoso - I.Medio alto	5968	0.01	3	3	2	8	1.89	0.66	0.30	2.85	Extremadamente importante
25	433	Red vial - Montañoso - I.Medio alto	4415	0.01	3	3	2	8	1.89	0.66	0.30	2.85	Extremadamente importante
50	724	Pastos limpios - Ondulado - I.Alto	6852	0.01	1	2	3	6	0.63	0.44	0.45	1.52	Mediana importancia
65	832	Cuerpos de agua - Montañoso - I.Medio	705	0.01	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	
69	821	Cuerpos de agua - Ondulado - I.Bajo	458	0.01	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	
39	124	Tejido urbano continuo - Ondulado - I.Alto	3808	0.01	3	2	3	8	1.89	0.44	0.45	2.78	Extremadamente importante
66	831	Cuerpos de agua - Montañoso - I.Bajo	250	0.00	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	
28	424	Red vial - Ondulado - I.Alto	3085	0.00	3	2	3	8	1.89	0.44	0.45	2.78	Extremadamente importante
81	624	Áreas deportivas - Ondulado - I.Alto	1922	0.00	2	2	3	7	1.26	0.44	0.45	2.15	Alta importancia
27	633	Áreas deportivas - Montañoso - I.Medio alto	832	0.00	2	3	2	7	1.26	0.66	0.30	2.22	Alta importancia
88	141	Tejido urbano continuo - Escarpado - I.Bajo	66	0.00	3	3	1	7	1.89	0.66	0.15	2.70	Extremadamente importante
47	233	Zonas industriales - Montañoso - I.Medio alto	719	0.00	3	3	2	8	1.89	0.66	0.30	2.85	Extremadamente importante
60	734	Pastos limpios - Montañoso - I.Alto	860	0.00	1	3	3	7	0.63	0.66	0.45	1.74	Mediana importancia
38	324	Zonas comerciales - Ondulado - I.Alto	1070	0.00	3	2	3	8	1.89	0.44	0.45	2.78	Extremadamente importante
90	441	Red vial - Escarpado - I.Bajo	65	0.00	3	3	1	7	1.89	0.66	0.15	2.70	Extremadamente importante
70	823	Cuerpos de agua - Ondulado - I.Medio alto	386	0.00	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	
77	224	Zonas industriales - Ondulado - I.Alto	1089	0.00	3	2	3	8	1.89	0.44	0.45	2.78	Extremadamente importante
61	742	Pastos limpios - Escarpado - I.Medio	364	0.00	1	3	2	6	0.63	0.66	0.30	1.59	Mediana importancia
84	333	Zonas comerciales - Montañoso - I.Medio alto	514	0.00	3	3	2	8	1.89	0.66	0.30	2.85	Extremadamente importante
78	134	Tejido urbano continuo - Montañoso - I.Alto	312	0.00	3	3	3	9	1.89	0.66	0.45	3.00	Extremadamente importante
80	434	Red vial - Montañoso - I.Alto	213	0.00	3	3	3	9	1.89	0.66	0.45	3.00	Extremadamente importante
87	142	Tejido urbano continuo - Escarpado - I.Medio	129	0.00	3	3	2	8	1.89	0.66	0.30	2.85	Extremadamente importante
89	442	Red vial - Escarpado - I.Medio	109	0.00	3	3	2	8	1.89	0.66	0.30	2.85	Extremadamente importante
67	833	Cuerpos de agua - Montañoso - I.Medio alto	352	0.00	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	
74	841	Cuerpos de agua - Escarpado - I.Bajo	2	0.00	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	
73	824	Cuerpos de agua - Ondulado - I.Alto	24	0.00	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	
85	334	Zonas comerciales - Montañoso - I.Alto	101	0.00	3	3	3	9	1.89	0.66	0.45	3.00	Extremadamente importante
95	234	Zonas industriales - Montañoso - I.Alto	26	0.00	3	3	3	9	1.89	0.66	0.45	3.00	Extremadamente importante
93	443	Red vial - Escarpado - I.Medio alto	3	0.00	3	3	2	8	1.89	0.66	0.30	2.85	Extremadamente importante
100	641	Áreas deportivas - Escarpado - I.Bajo	24	0.00	2	3	1	6	1.26	0.66	0.15	2.07	Alta importancia
99	834	Cuerpos de agua - Montañoso - I.Alto	50	0.00	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	
94	634	Áreas deportivas - Montañoso - I.Alto	27	0.00	2	3	3	8	1.26	0.66	0.45	2.37	Alta importancia
92	143	Tejido urbano continuo - Escarpado - I.Medio alto	3	0.00	3	3	2	8	1.89	0.66	0.30	2.85	Extremadamente importante
79	743	Pastos limpios - Escarpado - I.Medio alto	21	0.00	1	3	2	6	0.63	0.66	0.30	1.59	Mediana importancia
98	410	Red vial - Plano - I.Bajo	4	0.00	3	1	1	5	1.89	0.22	0.15	2.26	Alta importancia
97	110	Tejido urbano continuo - Plano - I.Bajo	1	0.00	3	1	1	5	1.89	0.22	0.15	2.26	Alta importancia
96	120	Tejido urbano continuo - Ondulado - I.Bajo	1	0.00	3	2	1	6	1.89	0.44	0.15	2.48	Alta importancia
86	710	Pastos limpios - Plano - I.Bajo	1	0.00	1	1	1	3	0.63	0.22	0.15	1.00	Baja importancia
91	320	Zonas comerciales - Ondulado - I.Bajo	1	0.00	3	2	1	6	1.89	0.44	0.15	2.48	Alta importancia

Fuente: Propia.

Figura 26
Distribución espacial del nivel de importancia para los SUDS.



Fuente: Propia - elaborada en Arcgis Pro.

11.3. Normalización de Uso de suelos, Pendiente e IHT, para las HRU's representativas de cada categoría – Pesos ponderados OE2.

En la Tabla 16 se relaciona por cada categoría la HRU representativa con sus respectivos pesos ponderados resultantes en el paso 2 numeral 10.3 y su respectiva normalización que actuará como ponderación para la selección del sistema SUDS.

Tabla 16
Normalización de variables de las HRU Para los pesos ponderados.

CATEGORÍAS	HRU_REPR	USO	PEND	IHT	SUMA GI 2	N_USO	N_PEND	N_IHT	N_SUMA
Baja importancia	711	0.63	0.22	0.15	1.00	63.01%	21.84%	15.15%	100.00%
Importante	722	0.63	0.44	0.30	1.37	46.00%	31.89%	22.11%	100.00%
Mediana importancia	734	0.63	0.66	0.45	1.74	36.22%	37.67%	26.12%	100.00%
Alta importancia	634	1.26	0.66	0.45	2.37	53.17%	27.65%	19.17%	100.00%
Extremadamente importante	124	1.89	0.44	0.45	2.78	67.96%	15.71%	16.34%	100.00%

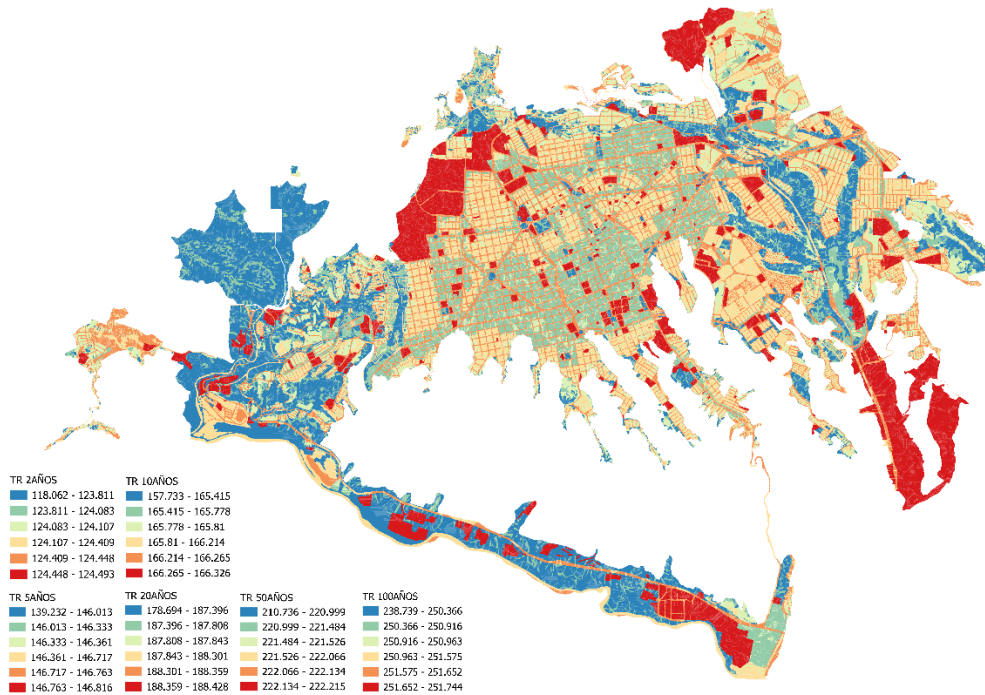
Fuente: Propia.

11.4. Evaluación entre HRU's con variable climática y demográfica.

11.4.1. HRU - intensidad.

El procedimiento de cruce entre intensidad y HRU descrito al finalizar el numeral 10.2.1.1 arroja como resultado una tabla que relaciona los datos del gridcode de la capa vectorial - HRU y los valores del ráster de cada intensidad, posteriormente, se carga a cada una de las HRU del shapefile las diferentes intensidades como se registra en la Tabla 17.

Figura 27
Distribución espacial de intensidades en las HRU's.



Fuente: Propia.

La Figura 27 muestra la distribución espacial de las diferentes intensidades del método simplificado - numeral 10.2.1 y que han sido cruzadas con las distintas clasificaciones de las HRU's, para la visualización de los datos se distribuyeron en seis (6) grupos de intervalos por cada intensidad bajo el método de clasificación de conteo igual por cuantil en QGIS.

Tabla 17
Intensidades de lluvia a nivel de HRU's.

No HRU	gridcode	CLASIFICACIÓN HRU's	TR2	TR5	TR10	TR20	TR50	TR100
	100							
8	112	Tejido urbano continuo - Plano - I.Medio	124.11	146.37	165.82	187.85	221.54	250.98
6	412	Red vial - Plano - I.Medio	124.44	146.75	166.25	188.34	222.12	251.63
34	312	Zonas comerciales - Plano - I.Medio	124.08	146.33	165.78	187.81	221.48	250.92
9	122	Tejido urbano continuo - Ondulado - I.Medio	124.10	146.35	165.80	187.83	221.51	250.95
51	722	Pastos limpios - Ondulado - I.Medio	123.81	146.01	165.41	187.40	221.00	250.36
4	422	Red vial - Ondulado - I.Medio	124.45	146.76	166.26	188.36	222.13	251.65
55	732	Pastos limpios - Montañoso - I.Medio	123.72	145.91	165.30	187.26	220.84	250.19
52	731	Pastos limpios - Montañoso - I.Bajo	123.71	145.89	165.27	187.24	220.81	250.15
19	612	Áreas deportivas - Plano - I.Medio	124.48	146.80	166.31	188.41	222.19	251.72
10	121	Tejido urbano continuo - Ondulado - I.Bajo	124.10	146.35	165.80	187.83	221.51	250.94
56	712	Pastos limpios - Plano - I.Medio	123.81	146.01	165.41	187.39	221.00	250.36
53	721	Pastos limpios - Ondulado - I.Bajo	123.82	146.03	165.43	187.41	221.02	250.39
18	622	Áreas deportivas - Ondulado - I.Medio	124.49	146.81	166.32	188.42	222.21	251.73
1	421	Red vial - Ondulado - I.Bajo	124.45	146.76	166.26	188.36	222.13	251.65
7	111	Tejido urbano continuo - Plano - I.Bajo	124.11	146.36	165.81	187.84	221.53	250.96
17	113	Tejido urbano continuo - Plano - I.Medio alto	124.12	146.37	165.82	187.86	221.54	250.98
3	411	Red vial - Plano - I.Bajo	124.41	146.72	166.21	188.30	222.07	251.57
13	132	Tejido urbano continuo - Montañoso - I.Medio	123.96	146.18	165.61	187.62	221.26	250.66
5	413	Red vial - Plano - I.Medio alto	124.43	146.75	166.25	188.34	222.11	251.62
59	714	Pastos limpios - Plano - I.Alto	123.78	145.98	165.38	187.35	220.95	250.31
11	131	Tejido urbano continuo - Montañoso - I.Bajo	123.64	145.81	165.19	187.14	220.70	250.02
29	322	Zonas comerciales - Ondulado - I.Medio	124.07	146.32	165.76	187.79	221.46	250.89
33	313	Zonas comerciales - Plano - I.Medio alto	124.08	146.33	165.78	187.81	221.48	250.92
37	311	Zonas comerciales - Plano - I.Bajo	124.08	146.33	165.78	187.80	221.48	250.91
57	713	Pastos limpios - Plano - I.Medio alto	123.81	146.01	165.42	187.40	221.00	250.37
20	621	Áreas deportivas - Ondulado - I.Bajo	124.48	146.80	166.31	188.41	222.20	251.72
12	432	Red vial - Montañoso - I.Medio	124.23	146.50	165.97	188.03	221.74	251.21
44	212	Zonas industriales - Plano - I.Medio	124.46	146.78	166.29	188.38	222.16	251.68
2	431	Red vial - Montañoso - I.Bajo	124.27	146.55	166.02	188.08	221.81	251.28
41	222	Zonas industriales - Ondulado - I.Medio	124.46	146.78	166.28	188.38	222.16	251.68
21	611	Áreas deportivas - Plano - I.Bajo	124.48	146.80	166.31	188.41	222.19	251.71
35	114	Tejido urbano continuo - Plano - I.Alto	124.12	146.37	165.82	187.86	221.54	250.98
58	711	Pastos limpios - Plano - I.Bajo	123.82	146.02	165.42	187.40	221.01	250.38
31	321	Zonas comerciales - Ondulado - I.Bajo	124.07	146.32	165.76	187.79	221.46	250.89
22	613	Áreas deportivas - Plano - I.Medio alto	124.48	146.80	166.31	188.41	222.19	251.72
63	814	Cuerpos de agua - Plano - I.Alto	124.16	146.43	165.89	187.93	221.63	251.08
45	213	Zonas industriales - Plano - I.Medio alto	124.46	146.78	166.29	188.38	222.16	251.69
32	414	Red vial - Plano - I.Alto	124.42	146.73	166.22	188.31	222.08	251.59
24	632	Áreas deportivas - Montañoso - I.Medio	124.49	146.82	166.33	188.43	222.22	251.74
23	631	Áreas deportivas - Montañoso - I.Bajo	124.49	146.81	166.32	188.42	222.20	251.73
64	214	Zonas industriales - Plano - I.Alto	124.46	146.78	166.29	188.38	222.16	251.69
49	723	Pastos limpios - Ondulado - I.Medio alto	123.82	146.03	165.43	187.41	221.02	250.39
42	221	Zonas industriales - Ondulado - I.Bajo	124.46	146.78	166.28	188.38	222.16	251.68
15	123	Tejido urbano continuo - Ondulado - I.Medio alto	124.10	146.35	165.80	187.83	221.51	250.95
16	423	Red vial - Ondulado - I.Medio alto	124.40	146.70	166.20	188.28	222.04	251.55
36	314	Zonas comerciales - Plano - I.Alto	124.04	146.29	165.72	187.75	221.41	250.83
46	232	Zonas industriales - Montañoso - I.Medio	124.46	146.78	166.28	188.38	222.16	251.68
43	211	Zonas industriales - Plano - I.Bajo	124.46	146.78	166.28	188.38	222.15	251.67
72	812	Cuerpos de agua - Plano - I.Medio	124.16	146.43	165.89	187.93	221.63	251.08
62	813	Cuerpos de agua - Plano - I.Medio alto	124.17	146.43	165.89	187.93	221.63	251.08
48	231	Zonas industriales - Montañoso - I.Bajo	124.46	146.78	166.28	188.38	222.16	251.68
26	623	Áreas deportivas - Ondulado - I.Medio alto	124.48	146.80	166.31	188.41	222.19	251.72
76	614	Áreas deportivas - Plano - I.Alto	124.46	146.77	166.28	188.37	222.15	251.67
83	331	Zonas comerciales - Montañoso - I.Bajo	123.75	145.94	165.34	187.31	220.89	250.24
82	332	Zonas comerciales - Montañoso - I.Medio	123.96	146.18	165.61	187.61	221.26	250.66
54	733	Pastos limpios - Montañoso - I.Medio alto	123.64	145.81	165.19	187.14	220.69	250.02
40	223	Zonas industriales - Ondulado - I.Medio alto	124.46	146.78	166.28	188.38	222.16	251.68
30	323	Zonas comerciales - Ondulado - I.Medio alto	124.06	146.31	165.75	187.77	221.44	250.87
71	741	Pastos limpios - Escarpado - I.Bajo	120.66	142.30	161.21	182.63	215.38	244.00
75	811	Cuerpos de agua - Plano - I.Bajo	124.14	146.40	165.86	187.90	221.59	251.03
68	822	Cuerpos de agua - Ondulado - I.Medio	124.17	146.44	165.89	187.94	221.64	251.09
14	133	Tejido urbano continuo - Montañoso - I.Medio alto	123.86	146.07	165.48	187.47	221.09	250.47
25	433	Red vial - Montañoso - I.Medio alto	124.00	146.23	165.67	187.68	221.33	250.75

No HRU	gridcode	CLASIFICACIÓN HRU's	TR2	TR5	TR10	TR20	TR50	TR100
50	724	Pastos limpios - Ondulado - I.Alto	123.74	145.93	165.32	187.29	220.88	250.23
65	832	Cuerpos de agua - Montañoso - I.Medio	124.13	146.39	165.85	187.88	221.57	251.02
69	821	Cuerpos de agua - Ondulado - I.Bajo	124.15	146.41	165.86	187.91	221.60	251.05
39	124	Tejido urbano continuo - Ondulado - I.Alto	124.10	146.35	165.80	187.83	221.51	250.95
66	831	Cuerpos de agua - Montañoso - I.Bajo	124.14	146.40	165.85	187.89	221.58	251.02
28	424	Red vial - Ondulado - I.Alto	124.06	146.30	165.74	187.77	221.44	250.86
81	624	Áreas deportivas - Ondulado - I.Alto	124.47	146.79	166.30	188.40	222.18	251.70
27	633	Áreas deportivas - Montañoso - I.Medio alto	124.41	146.72	166.21	188.30	222.07	251.57
88	141	Tejido urbano continuo - Escarpado - I.Bajo	123.03	145.09	164.37	186.21	219.60	248.79
47	233	Zonas industriales - Montañoso - I.Medio alto	124.43	146.74	166.24	188.33	222.10	251.62
60	734	Pastos limpios - Montañoso - I.Alto	123.59	145.75	165.12	187.06	220.60	249.92
38	324	Zonas comerciales - Ondulado - I.Alto	123.85	146.06	165.47	187.45	221.07	250.44
90	441	Red vial - Escarpado - I.Bajo	122.73	144.74	163.97	185.76	219.07	248.18
70	823	Cuerpos de agua - Ondulado - I.Medio alto	124.15	146.42	165.87	187.91	221.61	251.06
77	224	Zonas industriales - Ondulado - I.Alto	124.44	146.76	166.26	188.36	222.13	251.65
61	742	Pastos limpios - Escarpado - I.Medio	120.45	142.05	160.92	182.31	215.00	243.57
84	333	Zonas comerciales - Montañoso - I.Medio alto	123.95	146.17	165.60	187.60	221.24	250.64
78	134	Tejido urbano continuo - Montañoso - I.Alto	123.55	145.71	165.07	187.01	220.54	249.84
80	434	Red vial - Montañoso - I.Alto	123.64	145.81	165.19	187.14	220.70	250.02
87	142	Tejido urbano continuo - Escarpado - I.Medio	120.46	142.06	160.93	182.32	215.01	243.58
89	442	Red vial - Escarpado - I.Medio	120.46	142.05	160.93	182.32	215.01	243.58
67	833	Cuerpos de agua - Montañoso - I.Medio alto	123.99	146.22	165.65	187.66	221.31	250.72
74	841	Cuerpos de agua - Escarpado - I.Bajo	118.06	139.23	157.73	178.69	210.74	238.74
73	824	Cuerpos de agua - Ondulado - I.Alto	123.96	146.19	165.62	187.62	221.27	250.67
85	334	Zonas comerciales - Montañoso - I.Alto	121.95	143.82	162.93	184.58	217.68	246.60
95	234	Zonas industriales - Montañoso - I.Alto	124.43	146.74	166.24	188.33	222.10	251.62
93	443	Red vial - Escarpado - I.Medio alto	120.24	141.80	160.65	181.99	214.63	243.15
100	641	Áreas deportivas - Escarpado - I.Bajo	122.75	144.76	163.99	185.78	219.10	248.21
99	834	Cuerpos de agua - Montañoso - I.Alto	123.86	146.07	165.47	187.46	221.08	250.46
94	634	Áreas deportivas - Montañoso - I.Alto	124.24	146.52	165.99	188.05	221.77	251.24
92	143	Tejido urbano continuo - Escarpado - I.Medio alto	120.24	141.80	160.64	181.99	214.63	243.15
79	743	Pastos limpios - Escarpado - I.Medio alto	118.86	140.17	158.79	179.90	212.15	240.35
98	410	Red vial - Plano - I.Bajo	121.94	143.80	162.91	184.56	217.66	246.58
97	110	Tejido urbano continuo - Plano - I.Bajo	121.62	143.43	162.49	184.08	217.09	245.94
96	120	Tejido urbano continuo - Ondulado - I.Bajo	121.50	143.29	162.33	183.90	216.87	245.69
86	710	Pastos limpios - Plano - I.Bajo	119.73	141.20	159.96	181.22	213.71	242.11
91	320	Zonas comerciales - Ondulado - I.Bajo	120.54	142.15	161.04	182.44	215.16	243.75

Fuente: Propia.

La Tabla 18 contiene los porcentajes de normalización de las diferentes intensidades por cada categoría de importancia.

Tabla 18

Normalización de intensidades por categoría de importancia.

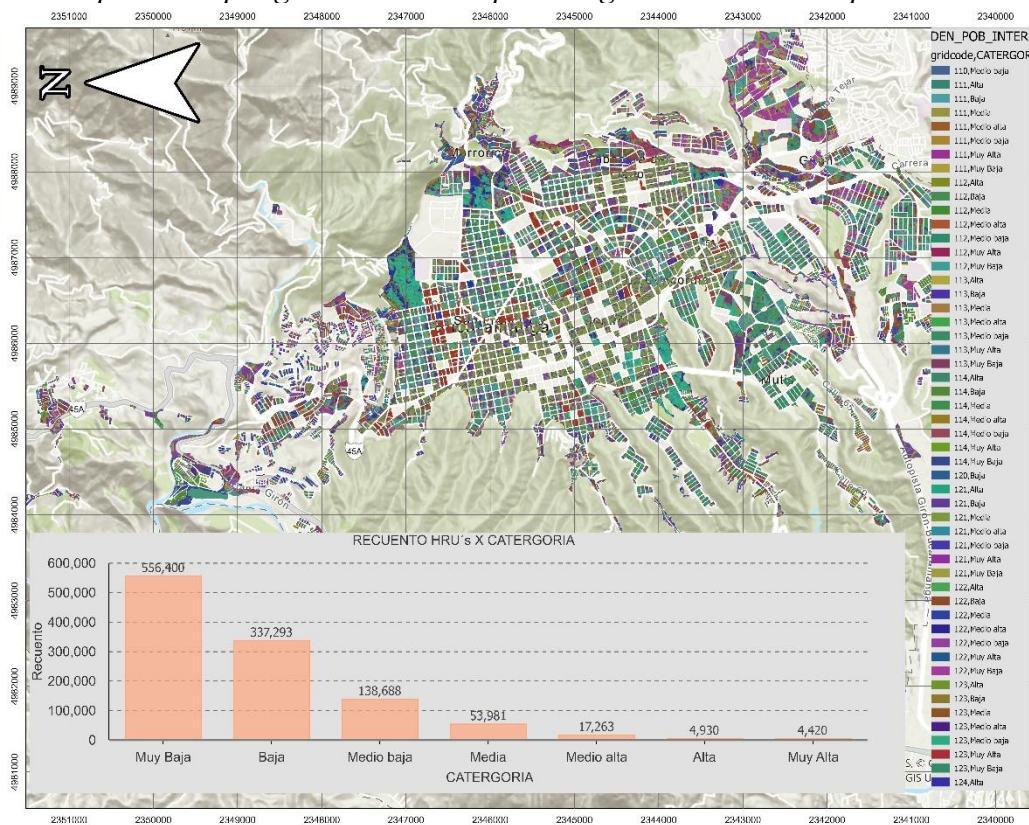
CATEGORÍAS	TR2	TR5	TR10	TR20	TR50	TR100
Baja importancia	4.30%	20.91%	35.43%	51.87%	77.01%	98.98%
Importante	4.31%	20.92%	35.43%	51.88%	77.02%	98.99%
Mediana importancia	4.81%	21.50%	36.10%	52.63%	77.90%	99.99%
Alta importancia	4.81%	21.51%	36.10%	52.64%	77.91%	100.00%
Extremadamente importante	4.79%	21.48%	36.07%	52.60%	77.87%	99.96%

Fuente: Propia.

11.4.2. HRU - Población.

La intersección de las 100 clasificaciones de HRU's y la densidad poblacional arrojó como resultado 85 clasificaciones de HRU, por lo tanto, las 15 clasificaciones restantes no fueron interceptadas debido a que en esas zonas no había datos poblacionales. Posteriormente, se realizó copia del shapefile de las HRU's original para asociar los resultados de la intersección, en este procedimiento se efectuó la depuración de aquellas clasificaciones de suelos que no relacionan habitantes, estos usos son; vías, cuerpos de agua y pastos limpios, agrupados en 45 clasificaciones, luego se calcularon las áreas en hectáreas de los todos los polígonos para determinar la población a nivel de HRU (Tabla 19) en cada una de las categorías de densidad poblacional teniendo como punto de partida el valor de densidad registrada en la columna 10 de la Tabla 8.

Figura 28
Distribución espacial de polígonos de HRU's por categorías de densidad poblacional.



Fuente: Propia - elaborada en Arcgis Pro.

Tabla 19
Población total calculada por categorías a nivel de HRU's.

No HRU	gridcode	CLASIFICACIÓN HRU's	MUY_BAJA	BAJA	MEDIO_BAJA	MEDIA	MEDIO_ALTA	ALTA	MUY_ALTA	TOTAL POB (Hab.)
	100									
8	112	Tejido urbano continuo - Plano - I.Medio	17076	49152	28850	14520	7247	3667	2717	123230
6	412	Red vial - Plano - I.Medio	0	0	0	0	0	0	0	0
34	312	Zonas comerciales - Plano - I.Medio	23015	13266	5301	1431	760	0	22	43796
9	122	Tejido urbano continuo - Ondulado - I.Medio	13748	22602	19448	12521	5149	2154	2964	78586
51	722	Pastos limpios - Ondulado - I.Medio	0	0	0	0	0	0	0	0
4	422	Red vial - Ondulado - I.Medio	0	0	0	0	0	0	0	0
55	732	Pastos limpios - Montañoso - I.Medio	0	0	0	0	0	0	0	0
52	731	Pastos limpios - Montañoso - I.Bajo	0	0	0	0	0	0	0	0
19	612	Áreas deportivas - Plano - I.Medio	0	673	323	0	86	0	0	1082
10	121	Tejido urbano continuo - Ondulado - I.Bajo	6546	11888	8558	5890	3075	1241	1217	38415
56	712	Pastos limpios - Plano - I.Medio	0	0	0	0	0	0	0	0
53	721	Pastos limpios - Ondulado - I.Bajo	0	0	0	0	0	0	0	0
18	622	Áreas deportivas - Ondulado - I.Medio	0	165	89	4	18	0	0	276
1	421	Red vial - Ondulado - I.Bajo	0	0	0	0	0	0	0	0
7	111	Tejido urbano continuo - Plano - I.Bajo	3673	11035	6836	3875	2357	833	659	29269
17	113	Tejido urbano continuo - Plano - I.Medio alto	3576	9210	6207	3233	1138	339	380	24082
3	411	Red vial - Plano - I.Bajo	0	0	0	0	0	0	0	0
13	132	Tejido urbano continuo - Montañoso - I.Medio	4007	4949	6989	3983	1349	302	537	22115
5	413	Red vial - Plano - I.Medio alto	0	0	0	0	0	0	0	0
59	714	Pastos limpios - Plano - I.Alto	0	0	0	0	0	0	0	0
11	131	Tejido urbano continuo - Montañoso - I.Bajo	3818	5218	4278	1924	998	129	256	16621
29	322	Zonas comerciales - Ondulado - I.Medio	5209	2492	948	457	98	0	32	9236
33	313	Zonas comerciales - Plano - I.Medio alto	5084	2666	863	363	205	0	5	9184
37	311	Zonas comerciales - Plano - I.Bajo	4873	2859	1440	194	141	0	14	9521
57	713	Pastos limpios - Plano - I.Medio alto	0	0	0	0	0	0	0	0
20	621	Áreas deportivas - Ondulado - I.Bajo	0	143	15	1	35	0	0	194
12	432	Red vial - Montañoso - I.Medio	0	0	0	0	0	0	0	0
44	212	Zonas industriales - Plano - I.Medio	4468	0	0	0	0	0	0	4468
2	431	Red vial - Montañoso - I.Bajo	0	0	0	0	0	0	0	0
41	222	Zonas industriales - Ondulado - I.Medio	4289	0	0	0	0	0	0	4289
21	611	Áreas deportivas - Plano - I.Bajo	0	150	80	0	36	0	0	266
35	114	Tejido urbano continuo - Plano - I.Alto	1985	2539	1607	2094	824	251	876	10175
58	711	Pastos limpios - Plano - I.Bajo	0	0	0	0	0	0	0	0
31	321	Zonas comerciales - Ondulado - I.Bajo	2397	1120	480	244	27	0	43	4312
22	613	Áreas deportivas - Plano - I.Medio alto	0	94	106	0	19	0	0	220
63	814	Cuerpos de agua - Plano - I.Alto	0	0	0	0	0	0	0	0
45	213	Zonas industriales - Plano - I.Medio alto	2183	0	0	0	0	0	0	2183
32	414	Red vial - Plano - I.Alto	0	0	0	0	0	0	0	0
24	632	Áreas deportivas - Montañoso - I.Medio	0	0	0	0	0	0	0	0
23	631	Áreas deportivas - Montañoso - I.Bajo	0	10	0	0	0	0	0	10
64	214	Zonas industriales - Plano - I.Alto	1702	0	0	0	0	0	0	1702
49	723	Pastos limpios - Ondulado - I.Medio alto	0	0	0	0	0	0	0	0
42	221	Zonas industriales - Ondulado - I.Bajo	1379	0	0	0	0	0	0	1379
15	123	Tejido urbano continuo - Ondulado - I.Medio alto	579	1136	1297	846	207	72	131	4269
16	423	Red vial - Ondulado - I.Medio alto	0	0	0	0	0	0	0	0
36	314	Zonas comerciales - Plano - I.Alto	847	284	105	54	17	0	0	1307
46	232	Zonas industriales - Montañoso - I.Medio	951	0	0	0	0	0	0	951
43	211	Zonas industriales - Plano - I.Bajo	922	0	0	0	0	0	0	922
72	812	Cuerpos de agua - Plano - I.Medio	0	0	0	0	0	0	0	0
62	813	Cuerpos de agua - Plano - I.Medio alto	0	0	0	0	0	0	0	0
48	231	Zonas industriales - Montañoso - I.Bajo	595	0	0	0	0	0	0	595
26	623	Áreas deportivas - Ondulado - I.Medio alto	0	11	2	3	1	0	0	16
76	614	Áreas deportivas - Plano - I.Alto	0	16	2	0	0	0	0	18
83	331	Zonas comerciales - Montañoso - I.Bajo	379	110	16	0	0	0	21	525
82	332	Zonas comerciales - Montañoso - I.Medio	372	41	0	0	0	0	24	437

No HRU	gridcode	CLASIFICACIÓN HRU's	MUY_BAJA	BAJA	MEDIO_BAJA	MEDIA	MEDIO_ALTA	ALTA	MUY_ALTA	TOTAL POB (Hab.)
54	733	Pastos limpios - Montañoso - I.Medio alto	0	0	0	0	0	0	0	0
40	223	Zonas industriales - Ondulado - I.Medio alto	355	0	0	0	0	0	0	355
30	323	Zonas comerciales - Ondulado - I.Medio alto	221	114	38	45	3	0	32	454
71	741	Pastos limpios - Escarpado - I.Bajo	0	0	0	0	0	0	0	0
75	811	Cuerpos de agua - Plano - I.Bajo	0	0	0	0	0	0	0	0
68	822	Cuerpos de agua - Ondulado - I.Medio	0	0	0	0	0	0	0	0
14	133	Tejido urbano continuo - Montañoso - I.Medio alto	81	133	181	136	51	11	8	602
25	433	Red vial - Montañoso - I.Medio alto	0	0	0	0	0	0	0	0
50	724	Pastos limpios - Ondulado - I.Alto	0	0	0	0	0	0	0	0
65	832	Cuerpos de agua - Montañoso - I.Medio	0	0	0	0	0	0	0	0
69	821	Cuerpos de agua - Ondulado - I.Bajo	0	0	0	0	0	0	0	0
39	124	Tejido urbano continuo - Ondulado - I.Alto	28	53	58	36	21	1	0	197
66	831	Cuerpos de agua - Montañoso - I.Bajo	0	0	0	0	0	0	0	0
28	424	Red vial - Ondulado - I.Alto	0	0	0	0	0	0	0	0
81	624	Áreas deportivas - Ondulado - I.Alto	0	0	0	0	0	0	0	0
27	633	Áreas deportivas - Montañoso - I.Medio alto	0	0	0	0	0	0	0	0
88	141	Tejido urbano continuo - Escarpado - I.Bajo	17	19	17	0	0	0	0	53
47	233	Zonas industriales - Montañoso - I.Medio alto	23	0	0	0	0	0	0	23
60	734	Pastos limpios - Montañoso - I.Alto	0	0	0	0	0	0	0	0
38	324	Zonas comerciales - Ondulado - I.Alto	16	4	2	2	0	0	0	24
90	441	Red vial - Escarpado - I.Bajo	0	0	0	0	0	0	0	0
70	823	Cuerpos de agua - Ondulado - I.Medio alto	0	0	0	0	0	0	0	0
77	224	Zonas industriales - Ondulado - I.Alto	17	0	0	0	0	0	0	17
61	742	Pastos limpios - Escarpado - I.Medio	0	0	0	0	0	0	0	0
84	333	Zonas comerciales - Montañoso - I.Medio alto	7	1	0	0	0	0	0	8
78	134	Tejido urbano continuo - Montañoso - I.Alto	4	2	6	5	0	1	0	18
80	434	Red vial - Montañoso - I.Alto	0	0	0	0	0	0	0	0
87	142	Tejido urbano continuo - Escarpado - I.Medio	3	3	4	0	0	0	0	10
89	442	Red vial - Escarpado - I.Medio	0	0	0	0	0	0	0	0
67	833	Cuerpos de agua - Montañoso - I.Medio alto	0	0	0	0	0	0	0	0
74	841	Cuerpos de agua - Escarpado - I.Bajo	0	0	0	0	0	0	0	0
73	824	Cuerpos de agua - Ondulado - I.Alto	0	0	0	0	0	0	0	0
85	334	Zonas comerciales - Montañoso - I.Alto	1	0	0	0	0	0	0	1
95	234	Zonas industriales - Montañoso - I.Alto	0	0	0	0	0	0	0	0
93	443	Red vial - Escarpado - I.Medio alto	0	0	0	0	0	0	0	0
100	641	Áreas deportivas - Escarpado - I.Bajo	0	0	0	0	0	0	0	0
99	834	Cuerpos de agua - Montañoso - I.Alto	0	0	0	0	0	0	0	0
94	634	Áreas deportivas - Montañoso - I.Alto	0	0	0	0	0	0	0	0
92	143	Tejido urbano continuo - Escarpado - I.Medio alto	0	0	1	0	0	0	0	1
79	743	Pastos limpios - Escarpado - I.Medio alto	0	0	0	0	0	0	0	0
98	410	Red vial - Plano - I.Bajo	0	0	0	0	0	0	0	0
97	110	Tejido urbano continuo - Plano - I.Bajo	0	0	0	0	0	0	0	0
96	120	Tejido urbano continuo - Ondulado - I.Bajo	0	0	0	0	0	0	0	0
86	710	Pastos limpios - Plano - I.Bajo	0	0	0	0	0	0	0	0
91	320	Zonas comerciales - Ondulado - I.Bajo	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL (Habitantes)			114447	142158	94147	51861	23863	9001	9937	445413
Total área (Ha)			969.89	351.36	139.39	54.24	19.13	6.06	4.36	1544.43

Fuente: Propia.

Los datos de la Tabla 19 están sintetizados en la Tabla 20 por medio de la interacción que hay entre las HRU, donde se relaciona el número de habitantes de las categorías de densidad poblacional en las diferentes categorías de importancia para los sistemas SUDS, con este

procedimiento se observa que la totalidad de habitantes se ubican sobre las categorías de mediana importancia, alta importancia y extremadamente importante.

Tabla 20

Relación entre categorías de importancia y población.

CATEGORÍAS	ÁREA CAT (Ha)	Habitantes x Categorías de densidad poblacional							TOTAL POB (Hab)	%POB
		MUY_BAJA	BAJA	MEDIO_BAJA	MEDIA	MEDIO_ALTA	ALTA	MUY_ALTA		
Baja importancia	24.99	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00%
Importante	651.60	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00%
Mediana importancia	451.85	0	1252	618	7	196	0	0	2073	0.47%
Alta importancia	1562.22	75192	101205	58536	29750	14949	6080	5057	290771	65.28%
Extremadamente importante	799.32	39254	39700	34994	22104	8718	2921	4880	152570	34.25%
Total	3489.97	114447	142158	94147	51861	23863	9001	9937	445413	100.00%

Fuente: Propia.

Con la información de los habitantes y la densidad poblacional se calcula el área dentro de cada una de las categorías de densidad poblacional para cada nivel de importancia.

Tabla 21

Áreas en Ha por categorías de densidad poblacional.

Categorías de importancia	ÁREA DEN (Ha)	ÁREAS (Ha)						
		MUY_BAJA	BAJA	MEDIO_BAJA	MEDIA	MEDIO_ALTA	ALTA	MUY_ALTA
Mediana importancia (Ha)	4.21	0.00	3.12	0.92	0.01	0.16	0.00	0.00
Alta importancia (Ha)	1026.33	637.22	252.36	87.24	31.12	12.09	4.09	2.22
Extremadamente importante (Ha)	518.10	332.66	99.00	52.15	23.12	7.05	1.97	2.14
TOTAL (Ha)	1548.66	969.89	354.51	140.31	54.25	19.29	6.06	4.36

Fuente: Propia

11.4.2.1. Relación de cobertura entre el área poblacional y las categorías de importancia.

Esta relación consiste en establecer el porcentaje de superficie de cada una de las categorías de importancia que contienen habitantes, para esto se empleará la sumatoria del área que cubre las diferentes densidades poblacionales con respecto al área espacial total de cada categoría de importancia, este procedimiento genera un indicador para determinar la necesidad de implementar sistemas SUDS con enfoque a la gestión del riesgo de la población.

- ✓ Extremadamente importante: 518.1Ha/799.32Ha = 64.82%
- ✓ Alta importancia: 1026.36Ha/1562.22Ha = 65.70%
- ✓ Mediana importancia: 4.21Ha/451.85Ha = 0.93%

11.4.3. Sistemas SUDS recomendados por categorías de importancia - matriz multicriterio de combinación lineal de pesos - OE3.

En este numeral se presentan los resultados de las matrices de selección de sistemas SUDS para las categorías de importancia.

Puntuaciones para la matriz multicriterio: No idóneo: 1, Idóneo bajo: 2, Idóneo: 3, Medianamente Idóneo: 4, Muy Idóneo: 5. Estas puntuaciones están descritas en el paso 3 del numeral 10.3.2.

- Extremadamente importante.

TR	No	TIPO DE SUDS	Extremadamente importante			TOTAL	APLICA	TR2	TR5	TR10	TR20	TR50	TR100
			N_USO	N_PEND	N_ITH								
			67.96%	15.71%	16.34%			4.79%	21.48%	36.07%	52.60%	77.87%	99.96%
2	1	Techos verdes	4	5	1	3.67	☑	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	2	Fachadas verdes	4	5	1	3.67	☑	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	20	50	3	2	1	3.88	☑	0.00	0.00	1.40	2.04	3.02	0.00
2	4	Alcorques inundables	5	2	2	4.04	☑	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	20	5	4	3	5	4.01	☑	0.00	0.00	1.45	2.11	0.00	0.00
2	5	10	6	2	2	4.04	☑	0.19	0.87	1.46	0.00	0.00	0.00
20	50	100	7	5	2	3.83	☑	0.00	0.00	0.00	2.01	2.98	3.83
		100	8	3	5	4.01	☑	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.00
2		9	3	5	4	3.48	☑	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	10	20	10	3	5	4.01	☑	0.00	0.86	1.45	2.11	0.00	0.00
2	5	11	4	5	4	4.16	☑	0.20	0.89	0.00	0.00	0.00	0.00
2		12	3	5	4	3.48	☑	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2		13	3	5	3	3.31	☑	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2		14	4	3	5	4.01	☑	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	5	15	3	5	3	3.31	☑	0.16	0.71	0.00	0.00	0.00	0.00
2		16	5	2	2	4.04	☑	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

• Alta importancia.

TR	No	TIPO DE SUDS	Alta importancia			TOTAL	APLICA	TR2	TR5	TR10	TR20	TR50	TR100
			N_USO	N_PEND	N_ITH								
			53.17%	27.65%	19.17%								
2	1	Techos verdes	4	5	1	3.70	<input checked="" type="checkbox"/>	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	2	Fachadas verdes	4	5	1	3.70	<input checked="" type="checkbox"/>	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10 20	50	3 Tanques de almacenamiento	5	2	1	3.40	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	0.00	1.23	1.79	2.65	0.00
2	4	Alcorques inundables	5	2	2	3.60	<input checked="" type="checkbox"/>	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10 20	5	Humedales	4	3	5	3.92	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	0.00	1.41	2.06	0.00	0.00
2 5	10	6 Cunetas verdes	5	2	2	3.60	<input checked="" type="checkbox"/>	0.17	0.77	1.30	0.00	0.00	0.00
20 50	100	7 Cuencas secas	4	5	2	3.89	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	0.00	0.00	2.05	3.03	3.89
	100	8 Zonas inundables	4	3	5	3.92	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.92
2	9	Zanjas de infiltración	3	5	4	3.74	<input checked="" type="checkbox"/>	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5 10	20	10 Tanques de infiltración	4	3	5	3.92	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	0.84	1.41	2.06	0.00	0.00
2 5	11	Pavimentos permeables	4	5	4	4.28	<input checked="" type="checkbox"/>	0.21	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00
2	12	Jardín microcuenca	3	5	4	3.74	<input checked="" type="checkbox"/>	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	13	Jardín de lluvia	3	5	3	3.55	<input checked="" type="checkbox"/>	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	14	Pozos de infiltración	4	3	5	3.92	<input checked="" type="checkbox"/>	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2 5	15	Zanja - bordo	3	5	3	3.55	<input checked="" type="checkbox"/>	0.17	0.76	0.00	0.00	0.00	0.00
2	16	Filtros	5	2	2	3.60	<input checked="" type="checkbox"/>	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

• Mediana importancia.

TR	TIPO DE SUDS	Mediana importancia			TOTAL	APLICA	TR2	TR5	TR10	TR20	TR50	TR100	
		N_USO	N_PEND	N_ITH									
		36.22%	37.67%	26.12%									
2	1	Techos verdes	4	5	1	3.59	<input type="checkbox"/>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	2	Fachadas verdes	4	5	1	3.59	<input type="checkbox"/>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10 20	50	3 Tanques de almacenamiento	5	2	1	2.83	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	0.00	1.02	1.49	2.20	0.00
2	4	Alcorques inundables	5	2	2	3.09	<input checked="" type="checkbox"/>	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10 20	5	Humedales	4	3	5	3.88	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	0.00	1.40	2.04	0.00	0.00
2 5	10	6 Cunetas verdes	5	2	2	3.09	<input checked="" type="checkbox"/>	0.15	0.66	1.11	0.00	0.00	0.00
20 50	100	7 Cuencas secas	4	5	2	3.85	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	0.00	0.00	2.03	3.00	3.85
	100	8 Zonas inundables	4	3	5	3.88	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.88
2	9	Zanjas de infiltración	3	5	4	4.01	<input checked="" type="checkbox"/>	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5 10	20	10 Tanques de infiltración	4	3	5	3.88	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	0.84	1.40	2.04	0.00	0.00
2 5	11	Pavimentos permeables	4	5	4	4.38	<input checked="" type="checkbox"/>	0.21	0.94	0.00	0.00	0.00	0.00
2	12	Jardín microcuenca	3	5	4	4.01	<input checked="" type="checkbox"/>	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	13	Jardín de lluvia	3	5	3	3.75	<input checked="" type="checkbox"/>	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	14	Pozos de infiltración	4	3	5	3.88	<input checked="" type="checkbox"/>	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2 5	15	Zanja - bordo	3	5	3	3.75	<input checked="" type="checkbox"/>	0.18	0.81	0.00	0.00	0.00	0.00
2	16	Filtros	5	2	2	3.09	<input checked="" type="checkbox"/>	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

• Importante.

TR	No	TIPO DE SUDS	Importante			TOTAL	APLICA	TR2	TR5	TR10	TR20	TR50	TR100
			N_USO	N_PEND	N_ITH								
			46.00%	31.89%	22.11%								
2	1	Techos verdes	4	5	1	3.66	<input type="checkbox"/>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	2	Fachadas verdes	4	5	1	3.66	<input type="checkbox"/>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10 20	50	3 Tanques de almacenamiento	5	2	1	3.16	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	0.00	1.12	1.64	2.43	0.00
2	4	Alcorques inundables	5	2	2	3.38	<input checked="" type="checkbox"/>	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10 20	5	Humedales	4	3	5	3.90	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	0.00	1.38	2.02	0.00	0.00
2 5	10	6 Cunetas verdes	5	2	2	3.38	<input checked="" type="checkbox"/>	0.15	0.71	1.20	0.00	0.00	0.00
20 50	100	7 Cuencas secas	4	5	2	3.88	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	0.00	0.00	2.01	2.99	3.84
	100	8 Zonas inundables	4	3	5	3.90	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.86
2	9	Zanjas de infiltración	3	5	4	3.86	<input checked="" type="checkbox"/>	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5 10	20	10 Tanques de infiltración	4	3	5	3.90	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	0.82	1.38	2.02	0.00	0.00
2 5	11	Pavimentos permeables	4	5	4	4.32	<input type="checkbox"/>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	12	Jardín microcuenca	3	5	4	3.86	<input checked="" type="checkbox"/>	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	13	Jardín de lluvia	3	5	3	3.64	<input checked="" type="checkbox"/>	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	14	Pozos de infiltración	4	3	5	3.90	<input checked="" type="checkbox"/>	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2 5	15	Zanja - bordo	3	5	3	3.64	<input checked="" type="checkbox"/>	0.16	0.76	0.00	0.00	0.00	0.00
2	16	Filtros	5	2	2	3.38	<input checked="" type="checkbox"/>	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

- Baja importancia.

TR	No	TIPO DE SUDS	Baja importancia			TOTAL	APLICA	TR2	TR5	TR10	TR20	TR50	TR100
			N_USO	N_PEND	N_ITH								
			63.01%	21.84%	15.15%								
2	1	Techos verdes	4	5	1	3.76	<input type="checkbox"/>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	2	Fachadas verdes	4	5	1	3.76	<input type="checkbox"/>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10 20 50	3	Tanques de almacenamiento	5	2	1	3.74	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	0.00	1.32	1.94	2.88	0.00
2	4	Alcorques inundables	5	2	2	3.89	<input checked="" type="checkbox"/>	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10 20	5	Humedales	4	3	5	3.93	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	0.00	1.39	2.04	0.00	0.00
2 5 10	6	Cunetas verdes	5	2	2	3.89	<input checked="" type="checkbox"/>	0.17	0.81	1.38	0.00	0.00	0.00
20 50 100	7	Cuencas secas	4	5	2	3.92	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	0.00	0.00	2.03	3.02	3.88
2	8	Zonas inundables	4	3	5	3.93	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.89
2	9	Zanjas de infiltración	3	5	4	3.59	<input checked="" type="checkbox"/>	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5 10 20	10	Tanques de infiltración	4	3	5	3.93	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	0.82	1.39	2.04	0.00	0.00
2 5	11	Pavimentos permeables	4	5	4	4.22	<input type="checkbox"/>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	12	Jardín microcuenca	3	5	4	3.59	<input checked="" type="checkbox"/>	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	13	Jardín de lluvia	3	5	3	3.44	<input checked="" type="checkbox"/>	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	14	Pozos de infiltración	4	3	5	3.93	<input checked="" type="checkbox"/>	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2 5	15	Zanja - bordo	3	5	3	3.44	<input checked="" type="checkbox"/>	0.15	0.72	0.00	0.00	0.00	0.00
2	16	Filtros	5	2	2	3.89	<input checked="" type="checkbox"/>	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

- Resumen de alternativas de sistemas por cada una de las categorías de importancia en los distintos periodos de retorno.

Tabla 22

Resumen de alternativas de sistemas SUDS en las categorías de importancia.

CATEGORÍAS	TR2	TR5	TR10
Baja importancia	Alcorques inundables-Cunetas verdes-Pozos de infiltración-Filtros Zanjas de infiltración-Jardín microcuenca-Pozos de infiltración	Tanques de infiltración	Humedales-Tanques de infiltración
Importante		Tanques de infiltración	Humedales-Tanques de infiltración
Mediana importancia	Pavimentos permeables	Pavimentos permeables	Humedales-Tanques de infiltración
Alta importancia	Pavimentos permeables	Pavimentos permeables	Humedales-Tanques de infiltración
Extremadamente importante	Pavimentos permeables	Pavimentos permeables	Cunetas verdes

CATEGORÍAS	TR20	TR50	TR100
Baja importancia	Humedales-Tanques de infiltración	Cuencas secas	Zonas inundables
Importante		Cuencas secas	Zonas inundables
Mediana importancia	Humedales-Tanques de infiltración	Cuencas secas	Zonas inundables
Alta importancia	Humedales-Tanques de infiltración	Cuencas secas	Zonas inundables
Extremadamente importante	Humedales-Tanques de infiltración	Tanques de almacenamiento	Zonas inundables

Fuente: Propia

12. Discusión

1. Para la creación de las unidades de respuesta hidrológica - HRU, dos de sus componentes - pendientes e índice de humedad topográfica, están basados en el modelo de elevación digital - MED, este elemento ha sido muy útil en la importancia de los análisis ejecutados que influyeron directamente dentro del grado de precisión deseada y representada en la resolución de detalle de la superficie de entorno estudiada, esto impactó de manera óptima en la escala de trabajo para la formación de las HRU's, en donde se generó una mayor diversificación de la superficie en las clases resultantes influyendo directamente de manera positiva en el proceso de evaluación de la matriz multicriterio.
2. El proceso de discretización del área de estudio a partir de las HRU logró establecer un conjunto de 100 clasificaciones y entre estas se obtuvo la codificación 112 categorizada como alta importancia, esta HRU compuesta por tejido urbano con pendiente plana e índice medio, presenta características espaciales ya que comprende 335 Ha correspondientes a 9.59% de la superficie de estudio donde abarca el 27.67% de la población urbana, esta zona debe concentrar un interés especial desde la gestión del riesgo para evitar posibles situaciones de inundaciones que pueden provocar diversidad de afectaciones para la población desde el aspecto humano hasta los daños materiales (Qin et al., 2013), por tal razón es importante implementar mecanismos de contención con sistemas SUDS para la redirección de los flujos de escorrentía ante altas precipitaciones.
3. La hipótesis propuesta para este estudio fue comprobada y validada, mediante implementación de variables espaciales extraídas a partir de herramientas SIG y conformadas bajo unidades de respuesta hidrológica permitió discretizar la zona de estudio en categorías de importancia para la formación de escorrentía, y a partir de esto evaluar distintas alternativas de sistemas urbanos de drenaje sostenibles - SUDS para seis (6) periodos de retorno diferentes que corresponde la inclusión de la variable climática. Por lo tanto, esta matriz como herramienta ha demostrado la capacidad predictiva en la selección de SUDS teniendo como base condiciones espaciales.

4. La razón por la cual se conformaron cinco (5) categorías de importancia para las distintas clasificaciones de las HRU's, se basó en el alto peso ponderado del análisis a nivel global realizado en el numeral 10.3.1.2, esto permitió identificar y separar los usos de suelos de acuerdo a la capacidad de infiltración del terreno, lo anterior, muestra que para la zona de estudio el factor antrópico tiene mayor incidencia ante los fenómenos de inundación (Martin-Mikle et al., 2015) en comparación con las demás variables que conforman las HRU's en el contexto urbano.
 - ✓ La categoría baja, importante y de mediana importancia muestra una transición ya que están conformadas por suelos de tipo permeable en donde su capacidad es de alta infiltración.
 - ✓ La zona crítica se ubica en las categorías de alta importancia y extremadamente importante, en donde el riesgo es más concentrado debido a la mayor impermeabilidad producto del crecimiento urbano, que conlleva a una menor infiltración aumentando la formación de escorrentía.

La creación de estas categorías de importancia como mecanismo para clasificar la impermeabilidad del suelo y seleccionar los distintos sistemas SUDS, ha demostrado la grado y efectividad del análisis multicriterio.

5. Los pesos de ponderación global para las variables de las HRU's determinados mediante la matriz de AHP - numeral 10.3.1.2, arrojó que el uso de suelos es la variables más relevante continuando por la pendiente y el índice de humedad topográfica, estos resultados en donde el uso de suelo tiene la más alta ponderación guarda relación con estudios realizados sobre la importancia que tienen la modificaciones de las coberturas del suelo por acciones antrópicas en zonas urbanas, en donde las altas precipitaciones tienden a ocasionar afectaciones por el alto volumen de escorrentía generado conllevando a la sobrecarga de los sistemas de drenaje convencionales, especialmente en ciudades con alta densidad poblacional (MINISTERIO DE VIVIENDA, 2022). Ahora, es importante anotar que la pendiente y el índice de humedad topográfica son variables importantes en el direccionamiento de la escorrentía, pero en tienen una menor capacidad para modificar la infiltración en comparación con las actividades antrópicas, estas variables tienen mayor

relevancia a nivel hidrológico dentro de una cuenca rural en comparación con una cuenca urbana (M. E. S. Rodríguez, 2020).

6. La relación existente entre el área superficial y la densidad poblacional presenta una implicación en la gestión del riesgo, en donde la categoría de densidad “Muy alta” tiene una baja superficie lo cual significa que estos puntos concentran cantidades considerables de habitantes ante el riesgos de inundaciones en una menor área y por ello es fundamental que estas zonas sean atendidas para brindar seguridad con la aplicación de sistemas SUDS adecuados, ahora, en contraste las zonas categorizadas con menores densidades contienen la mayor cantidad de habitantes debido a la amplia área superficial que cubre, por lo tanto, estas zonas tienen la posibilidad de implementar sistemas SUDS con mejores capacidades de infiltración de aguas lluvias entre las que se encuentran los tanques de infiltración, humedales, etc. Estos escenarios son fundamentales en los procesos de toma de decisiones y enmarcándose en iniciativas de reducción y resiliencia en el “Making Cities Resilient - MCR 2020”.

7. La evaluación de la matriz multicriterio presenta mayor relevancia sobre los usos de suelos en cuanto a los efectos para la generación de la escorrentía dentro de un contexto urbano, pero algunos de los sistemas SUDS evaluados desde el aspecto funcional responden operativamente mejor a la variable pendiente o índice de humedad topográfica en los procesos de infiltración, por lo tanto, es importante que la implementación de esos sistemas sea ubicados estratégicamente en sitios esenciales en donde desarrollen su capacidad adecuadamente en conjunto con los sistemas de drenaje convencionales para fortalecer la resiliencia ante lluvias extremas en áreas urbanas (Zhu et al., 2019), adicionalmente, es importante mencionar desde la perspectiva de implementación y mantenimiento se debe realizar por parte de personal especializado en temas de infraestructura verde.

13. Conclusiones

1. La metodología realizada para llevar a cabo la evaluación multicriterio a partir de información de tipo espacial bajo el ambiente SIG, ha evidenciado que el determinante del riesgo sobre los fenómenos de inundaciones en la zona de estudio tiene su origen en variables de tipo antrópico, que corresponde a la capa de uso de suelos el cual asocia un mayor peso ponderado, lo anterior, refleja la superioridad sobre factores de tipo geomorfológicos como la pendiente e índice que conforman las HRU, en donde estos dos últimos factores son fundamentales en cuencas rurales.
2. Las variables espaciales y su conexión con los sistemas SUDS mediante las unidades de respuesta hidrológicas - HRU, requirió procesar grandes volúmenes de datos para analizar y estructurar la evaluación multicriterio, permitiendo validar la hipótesis propuesta para el desarrollo del presente proyecto, este análisis demostró el predominio espacial de la cobertura de tejido urbano como superficie impermeable entre las diferentes clases de usos de suelo, en donde esta capa como variable dentro de las HRU ejerce mayor peso de ponderación sobre la matriz multicriterio, por lo tanto, esta cobertura se traduce como riesgo para la seguridad urbana ocasionada por situaciones asociadas a dinámicas de crecimientos no planificados y en donde es necesario estrategias de mitigación ante posibles eventos de inundaciones mediante sistemas SUDS.
3. La propuesta de implementar unidades de respuesta hidrológica - HRU como herramienta de apoyo para la toma de decisiones ante la gestión del riesgo, en donde las condiciones del uso de suelo y pendiente, permite la iniciativa mediante este estudio de aplicación de infraestructura verde de acuerdo con los niveles de categorización según la ponderación de las HRU, de esta manera la propuesta desarrollada integra la planificación urbana con la mitigación del riesgo de inundación logrando mejorar el manejo de los recursos hídricos.
4. La matriz multicriterio para la evaluación de sistemas SUDS permite diferenciar las distintas alternativas de infraestructura verde en distintos periodos de retorno desde los 2 a

100 años, esto ofrece una hoja de ruta sobre los requerimientos de mitigación en la zona de estudio de acuerdo con la variable climática.

- ✓ Para las condiciones de baja complejidad conformadas por intensidades de 2 a 20 años se proponen sistemas de tipo pavimentos permeables, cunetas verdes, tanques de infiltración y humedales.
- ✓ Para condiciones con aspecto climático extremo que involucra intensidades de 50 a 100 años, se proponen alternativas como cuencas secas y zonas inundables.

Ahora, para lograr materializar estas alternativas es necesario analizar las condiciones existentes con las propuestas de infraestructura verde para integrar un único modelo de riesgo, en donde los sistemas SUDS operen adecuadamente como infraestructura complementaria a la existente (Olaya González et al., 2024) realizando los procesos de retención e infiltración de la escorrentía natural.

5. La contribución final de este proyecto es la evaluación de la matriz multicriterio como herramienta destinada a la planificación urbana, en donde es de gran importancia poder ser incluida dentro un ámbito multidisciplinario, como la ingeniería hidráulica encargada de los análisis y simulaciones de los diferentes sistemas, que junto con el componente urbanístico, ambiental, estructural y geotécnico, permite obtener soluciones acorde a las necesidades del entorno urbano bajo la viabilidad técnica en los procesos de retención e infiltración que garanticen la estabilidad de estos sistemas propuestos dentro de la gestión social encaminada a la integración paisajística.

14. Recomendaciones.

1. Se recomienda incluir como instrumento técnico el mapa de unidades de respuesta hidrológica - HRU en los ajustes o revisiones del plan de ordenamiento territorial - POT, en donde se incorporen aspectos de impermeabilidad asociados a las acciones antrópicas denotadas en las modificaciones de las coberturas de los suelos logrando de esta manera mejorar las condiciones de planificación urbana que involucra los efectos de riesgos por inundaciones, por lo tanto, es fundamental priorizar en términos económicos mediante presupuestos los temas de infraestructura verde como mecanismos que complementen los sistemas de drenaje convencionales para mejorar el manejo adecuado de la escorrentía superficial. Ahora, como mejora ante la situación actual y mecanismo de control en el uso de suelos se podría regular la cobertura máxima de impermeabilidad en los nuevos proyectos o de transformación urbana, este accionar se alinea con estrategias de gestión para la distribución de la escorrentía mediante la reducción de la impermeabilidad de la superficie aumentando las retenciones (Joshi et al., 2021).
2. Es recomendable para mejorar el análisis multicriterio basado en las unidades de respuesta hidrológica – HRU implementar un modelo de tipo hidrológico e hidráulico para verificar la capacidad de los sistemas propuestos en cada una de las categorías de importancia ante los distintos periodos de retorno, además, es fundamental cruzar la información de las distintas HRU con la red de drenaje convencional con la finalidad de lograr proyectar la ubicación estratégica de los sistemas SUDS de acuerdo a su capacidad de operación garantizando un adecuado funcionamiento en armonía con la red actual.
3. Se recomienda dentro de las acciones de seguimiento para la planificación y ordenamiento del territorio destinadas al control y monitoreo de la cobertura de los suelos, garantizar los espacios naturales como superficie permeable que ayude en los procesos de infiltración, mediante la obtención de información primaria como imágenes tipo ortofotos con optimas calidades en donde se verifique el estado de la cobertura de los suelos e integrarlo dentro del sistema SIG.

4. Es recomendable en la implementación de los sistemas SUDS en sus diferentes tipologías contar con los espacios o puntos específicos que garanticen un funcionamiento adecuado, esto es un factor decisivo dentro de los proyectos de tipo urbano donde los costos de ejecución deben incluir el valor económico de la disponibilidad del terreno que cuente con los aspectos hidrológicos adecuados para los procesos de infiltración y que este espacio garantice la estabilidad estructural de las edificaciones de la zona adyacente, esto es una variable fundamental y adaptarse dentro de la matriz multicriterio generaría un peso de mayor objetividad en la elección del sistema a implementar, esta integración podría ser a través de zonas homogéneas geoeconómicas catastrales en el modelo SIG.

5. Dando respuesta al último objetivo específico OE4, para dar un correcto funcionamiento de la matriz con proyección de aplicabilidad, se recomienda realizar controles de seguimiento y actualizaciones.
 - Formular indicadores de seguimiento que sean evaluados en periodicidades constantes, donde se verifique el desempeño de la matriz multicriterio en las diferentes categorías de importancia, como; la reducción de caudales, eficiencia y estado de los sistemas implementados, estado de la infraestructura adyacente, mantenimientos, etc.
 - Es recomendable aplicar una periodicidad constante en años para actualizar la matriz destinada a calibrar los diferentes pesos ponderados de las variables que la componen, teniendo en cuenta que el crecimiento urbano es dinámico afectando directamente la superficie de permeabilidad como ha sido mencionado en líneas anteriores, al igual que el componente climático en donde las lluvias pueden cambiar su comportamiento debido al cambio climático con precipitaciones más intensas.
 - Dentro de las actualizaciones a la matriz multicriterio puede incluirse nuevas variables que sean objetivas en el contexto del drenaje urbano, esto conlleva a redistribuir los pesos ponderados de cada una, donde permitirá afinar con muy buen detalle el modelo espacial que mejorará el seguimiento de la infraestructura del drenaje.

15. Referencias

- Adam Schneider. (2003). *GPS Visualizer*. <https://tinyurl.com/2utknf5y>
- Alcaldía de Bucaramanga. (2025, May 18). *Descripción*. <https://tinyurl.com/yc5t4t2j>
- Alvarado Batres, C., & Barahona-Palomo, M. (2016). Comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la Cuenca del río Suquiapa, El Salvador. *Cuadernos de Investigación*, 9, 23–33. <https://tinyurl.com/mttakp8e>
- Arreguín Cortés, F. I., López Pérez, M., & Marengo Mogollón, H. (2016, September). Las inundaciones en un marco de incertidumbre climática. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, VII, 5–13. <https://tinyurl.com/yxtbd5jm>
- Bermúdez Valero, M. L. (2021). *Sistemas urbanos de drenaje sostenible (suds) en américa latina: ¿una solución basada en la naturaleza con criterio social?* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana Bogotá]. <https://tinyurl.com/5n96u7wx>
- Bernet, D. B., Trefalt, S., Martius, O., Weingartner, R., Mosimann, M., Röthlisberger, V., & Zischg, A. P. (2019). Characterizing precipitation events leading to surface water flood damage over large regions of complex terrain. *Environmental Research Letters*, 14(6). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab127c>
- Bernhardsen, T. (1999). *Geographical Information Systems: An introduction* (3rd ed.). John Wiley and Sons.
- BERRY, J. K. (1990). *Maps as data: fundamental concepts and applications in gis technology for resource management*.
- BID. (2015). *Indicadores de Riesgo de Desastre y de Gestión de Riesgos Programa para América Latina y el Caribe Colombia BID NOTA TÉCNICA* (pp. 1–105). <http://www.iadb.org>
- BID. (2023, December 8). *Sistemas Innovadores de Drenaje Pluvial Urbano en Colombia: un enfoque diferencial para gestionar eventos extremos provocados por el cambio climático considerando aspectos de planificación, género y sostenibilidad*.
- Bozorg-Haddad Editor, O. (2021). *Springer Water Essential Tools for Water Resources Analysis, Planning, and Management* (Omid Bozorg-Haddad, Ed.). Springer. <http://www.springer.com/series/13419>
- Bustos Catari, X. (2013). Desarrollo de un sistema de información geoespacial con uso de software libre. *Terra*, 28, 11–38. <https://tinyurl.com/bdfkypaz>

- Cabrera-Balarezo, J. J., Timbe-Castro, L. M., & Crespo-Sánchez, P. J. (2019). Evaluación del modelo HEC-HMS para la simulación hidrológica de una cuenca de páramo. *DYNA (Colombia)*, 86(210), 338–344. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.70738>
- Calvano, F. R., Margarita, H., & Fontalvo, R. (2014). El uso del suelo, ¿Un problema de capacidad productiva y de políticas públicas? *Logos Ciencia & Tecnología*, 5, 213–231. <https://tinyurl.com/d25fb7py>
- Castillo Sánchez, V. M., & Gómez Plaza, A. (2002). Modelización de la respuesta hidrológica en medios mediterráneos semiáridos: efecto de la humedad antecedente. *Cuad. Soco Esp. Cien*, 13, 85–90. <https://tinyurl.com/bdhhbs72>
- Chen, H. (1996). *Object Watershed Link Simulation (OWLS)* [Tesis doctoral]. Oregon State University.
- Clarke, K. C. (1997). *Getting Started with Geographic Information Systems* (Prentice Hall, Ed.; 5th ed.). Pearson.
- Conesa García, C. (1996). Áreas de aplicación medioambiental de los SIG, modelización y avances recientes. *Papeles de Geografía*, 101–115. <https://tinyurl.com/2zk47hhc>
- Copetti, D., Marziali, L., Viviano, G., Valsecchi, L., Guzzella, L., Capodaglio, A. G., Tartari, G., Polesello, S., Valsecchi, S., Mezzanotte, V., & Salerno, F. (2019). Intensive monitoring of conventional and surrogate quality parameters in a highly urbanized river affected by multiple combined sewer overflows. *Water Science and Technology: Water Supply*, 19(3), 953–966. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.146>
- Cubides, E., & Santos, G. (2018). Control de escorrentías urbanas mediante Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS): Pozos/Zanjas de infiltración. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 12(24), 32–42. <https://doi.org/10.31908/19098367.3813>
- De Luca, J. M., De Luca, A., Adams, J. A., & Domínguez, G. A. (2018). La utilización de técnicas multicriterios para la selección de casos de estudio en ciencias de la administración. *Visión de Futuro*, 22(2), 36–50. <https://tinyurl.com/y9v4hr3a>
- ENVI. (2025). *Geospace Solution*. <https://tinyurl.com/2pkv568h>
- Esri. (2025). *¿Qué es ArcGIS?* <https://tinyurl.com/2868bfsf>
- Ferrans, P., Torres, M. N., Temprano, J., & Rodríguez Sánchez, J. P. (2022). Sustainable Urban Drainage System (SUDS) modeling supporting decision-making: A systematic quantitative

- review. *Science of the Total Environment*, 806, 1–14.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150447>
- García, M., Sánchez, F. D., Marín, R., Guzmán, H., Verdugo, N., Domínguez, E., Vargas, O., Panizzo, L., Sánchez, N., Gómez, J., & Córtes, G. (1998). El agua. In *El medio ambiente en Colombia*. (pp. 114–189). IDEAM. <https://tinyurl.com/ydx2te46>
- García Reinoso, P. L., Méndez Monroy, J. F., & Zarate Jiménez, M. F. (2017). Delimitation of Colombia hydrologic regions. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(1), 132–151.
<https://doi.org/10.14482/inde.35.1.8946>
- Geoenseñanza. (2006). Los Sistemas de Información Geográfica. *Geoenseñanza*, 11, 107–116.
<https://tinyurl.com/59e29haf>
- Geraldi, A. M., Cintia Piccolo, ; M., & Perillo, G. M. E. (2010). Delimitación y estudio de cuencas hidrográficas con modelos hidrológicos. *Investigaciones geográficas*, 215–225.
<https://tinyurl.com/34axmeue>
- Jaime, E., Larín, R., & Garea, E. (2011). Hacia métodos de análisis de datos espaciales ráster en el nivel semántico. *Computación y Sistemas*, 15(1), 91–106. <https://tinyurl.com/m68h6z22>
- Jones, C. B. (2014). *Geographical information systems and computer cartography* (Routledge, Ed.; 1st ed.).
- Joshi, P., Leitão, J. P., Maurer, M., & Bach, P. M. (2021). Not all SuDS are created equal: Impact of different approaches on combined sewer overflows. *Water Research*, 191, 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116780>
- Jumbo Castillo, F. A. (2015). Delimitación automática de microcuencas utilizando datos SRTM de la NASA. *Enfoque UTE*, 81–97. <https://tinyurl.com/ms2hftm9>
- Kong, F., & Rui, X. (2003). TOPMODEL 中地形指数计算方法的探讨. *Advances in Water Science*, 4(1), 1–5.
- Maguire, D. J. (1991). OVERVIEW AND DEFINITION OF GIS. In M. F. Goodchild & D. W. Rhind (Eds.), *Geographical information systems: principles and applications* (p. 9).
<https://tinyurl.com/2t4djc8h>
- Martínez, R., Chacón, L., González, J., & Gómez, H. (2016). Aplicación de los sig en la organización, análisis y divulgación de la información de suelo producida en laboratorio. *GEOENSEÑANZA*, 11, 51–62. <https://tinyurl.com/t5rhh5d9>

- Martin-Mikle, C. J., de Beurs, K. M., Julian, J. P., & Mayer, P. M. (2015). Identifying priority sites for low impact development (LID) in a mixed-use watershed. *Landscape and Urban Planning*, *140*, 29–41. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.04.002>
- Masumoto, T., Yoshida, T., & Kubota, T. (2006). An index for evaluating the flood-prevention function of paddies. *Paddy and Water Environment*, *4*(4), 205–210. <https://doi.org/10.1007/s10333-006-0050-x>
- Mejía Puentes, L. E. (2024). *Desarrollo de herramientas para el registro y seguimiento de SUDS: Caso de estudio alcorques inundables ubicados en la Calle 132 con Avenida Ciudad de Cali, en la ciudad de Bogotá*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia Bogotá]. <https://tinyurl.com/55yaa9p2>
- MINISTERIO DE VIVIENDA. (2022). *Guía metodológica para la formulación e implementación de Sistemas Urbanos De Drenaje Sostenible versión 0*. <https://tinyurl.com/7wffhtdj>
- Molina, A. M., López, L. F., & Villegas, G. I. (2005). Los sistemas de información geográfica (SIG) en la planificación municipal. *Escuela de Ingeniería de Antioquía, Medellín*, *4*, 21–31. <https://tinyurl.com/4zc75j4w>
- Morad, M., & Triviño Pérez, A. (2001). *Sistemas de Información Geográfica y modelizaciones hidrológicas: una aproximación a las ventajas y dificultades de su aplicación*. 23–46. <https://tinyurl.com/utb24nm6>
- Olaya González, J. C., Nalesso, M., Lefevre, B., & Schloeter, L. (2024). *Plan de adaptación a inundaciones influenciadas por el cambio climático Ciudad Colonial de Santo Domingo República Dominicana*. <http://www.iadb.org>
- Ossa-Moreno, J., Smith, K. M., & Mijic, A. (2017). Economic analysis of wider benefits to facilitate SuDS uptake in London, UK. *Sustainable Cities and Society*, *28*, 411–419. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.10.002>
- Pappalardo, V., La Rosa, D., Campisano, A., & La Greca, P. (2017). The potential of green infrastructure application in urban runoff control for land use planning: A preliminary evaluation from a southern Italy case study. *Ecosystem Services*, *26*, 345–354. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.04.015>
- Pérez González, M. E., & García Rodríguez, P. (2006). Aplicaciones de la teledetección en hidrología. *Observatorio Medioambiental*, *9*, 171–186. <https://tinyurl.com/3pepsx5m>

- Pérez Guerra, G. A., Sosa Franco, I., Machado García, N., & Ruiz Pérez, M. E. (2023). Herramientas SIG, revisión de sus fundamentos, tipos y relación con las bases de datos espaciales. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 32, 1–12. <https://cu-id.com/2177/v32n3e10>
- Qin, H. peng, Li, Z. xi, & Fu, G. (2013). The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. *Journal of Environmental Management*, 129, 577–585. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.026>
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., & Planchon, O. (1991). The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5(1), 59–79. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050106>
- Riaño-Luna, C. E., & Palomino-Leiva, M. L. (2015). Proceso analítico jerárquico para evaluar tres laboratorios virtuales en la educación superior. *ENTRAMADO*, 11(1), 194–204. <https://doi.org/10.18041/entramado.2015v11n1.21102>
- Roa Lobo, J., & Ulrich, K. (2007). Modelos de elevación digital (MED) a partir de sistemas satelitales. Una introducción y análisis comparativo en la cordillera de Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 49, 11–42. <https://tinyurl.com/mpm7w4nv>
- Roa Lobo, J., & Ulrich, K. (2012). Uso del índice topográfico de humedad (ITH) para el diagnóstico de la amenaza por desborde fluvial, Trujillo-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 53(1), 109–126. <https://tinyurl.com/mu3ymkx4>
- Rodríguez, D., Torrealba, W., & Carlos Rincón, J. (2018). Evaluation of “gis” related tools and their applications in the rivers hydraulic modeling. *Artículo de Investigación*, 20(1), 201602–204730. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14560.94728>
- Rodríguez, M. E. S. (2020). Zonificación de la amenaza ante inundaciones a partir de un método de evaluación multicriterio en la ciudad de Santiago de Cali, Colombia. *GeoFocus*, 2020(25), 47–76. <https://doi.org/10.21138/GF.661>
- Alfaro, I. A., Chavez, J. A., Cuestas, I. E., Mejía, C. J., Landaverde, M., & Campos, S. (2020). Estudio sobre infiltración y su relación con la geología del Área Metropolitana de San Salvador. *Revista Geológica de América Central*, 63, 1–17. <https://doi.org/10.15517/rgac.v63i0.43401>
- Sedano-Cruz, K., Carvajal-Escobar, Y., & Díaz, J. Á. (2013, April 12). Análisis de aspectos que incrementan el riesgo de inundaciones en Colombia. *Revista Luna Azul*, 37, 219–238. <https://tinyurl.com/3rbdn8az>

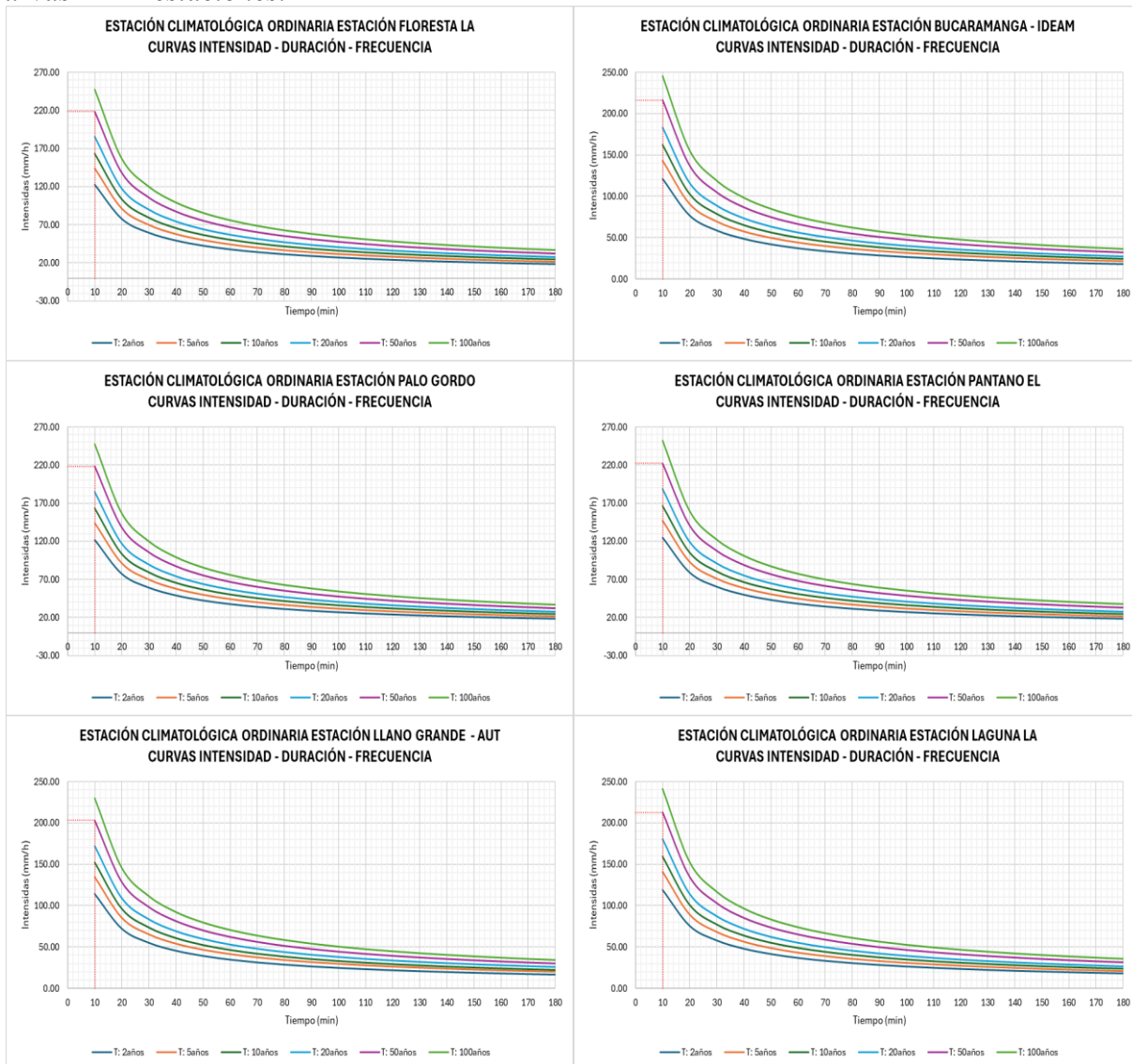
- Sosa-Pedroza, J., & Martínez-Zúñiga, F. (2009). Los sistemas de información geográfica y su aplicación en enlaces de comunicaciones. *Científica*, *13*, 27–34. <https://tinyurl.com/2edt5uz6>
- Suárez-Inclán, A. M., Allende-Prieto, C., Roces-García, J., Rodríguez-Sánchez, J. P., Sañudo-Fontaneda, L. A., Rey-Mahía, C., & Álvarez-Rabanal, F. P. (2022). Development of a Multicriteria Scheme for the Identification of Strategic Areas for SUDS Implementation: A Case Study from Gijón, Spain. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(5). <https://doi.org/10.3390/su14052877>
- Talavera Pereira, R. (2007). Retos que afrontan los lenguajes derivados de SGML, para su uso en Sistemas de información geográfico Web (WEBSIG). *MULTICIENCIAS*, *7*, 53–62. <https://tinyurl.com/36tcucju>
- Talbot, C. J., Bennett, E. M., Cassell, K., Hanes, D. M., Minor, E. C., Paerl, H., Raymond, P. A., Vargas, R., Vidon, P. G., Wollheim, W., & Xenopoulos, M. A. (2018). The impact of flooding on aquatic ecosystem services. *Biogeochemistry*, *141*(3), 439–461. <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0449-7>
- Tavakol-Davani, H., Burian, S. J., Devkota, J., & Apul, D. (2016). Performance and Cost-Based Comparison of Green and Gray Infrastructure to Control Combined Sewer Overflows. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, *2*(2). <https://doi.org/10.1061/jswbay.0000805>
- Trapote Jaume, A. (2016). Gestión de las aguas pluviales en entornos urbanos mediante técnicas de Drenaje Sostenible. *Journal of Engineering and Technology*, *5*(2), 26–40. <https://doi.org/10.22507/jet.v5n2a1>
- Trujillo, J. (2021). *Análisis e identificación de zonas con alto riesgo de inundaciones en el área metropolitana de Bucaramanga* [Proyecto pregrado, Universidad Militar Nueva Granada]. <https://tinyurl.com/47f3rjmn>
- Trujillo Ocampo, J. G. (2021). *Análisis e Identificación de Zonas con Alto Riesgo de Inundaciones en el Área Metropolitana de Bucaramanga*. [Universidad Militar Nueva Granada.]. <https://tinyurl.com/47f3rjmn>
- Van Westen, Cees. J. (1994). GIS in landslide hazard zonation: a review, with examples from the Andes of Colombia. In M. F. Price & L. Heywood (Eds.), *Mountain Environments and GIS* (pp. 135–165). Taylor and Francis.

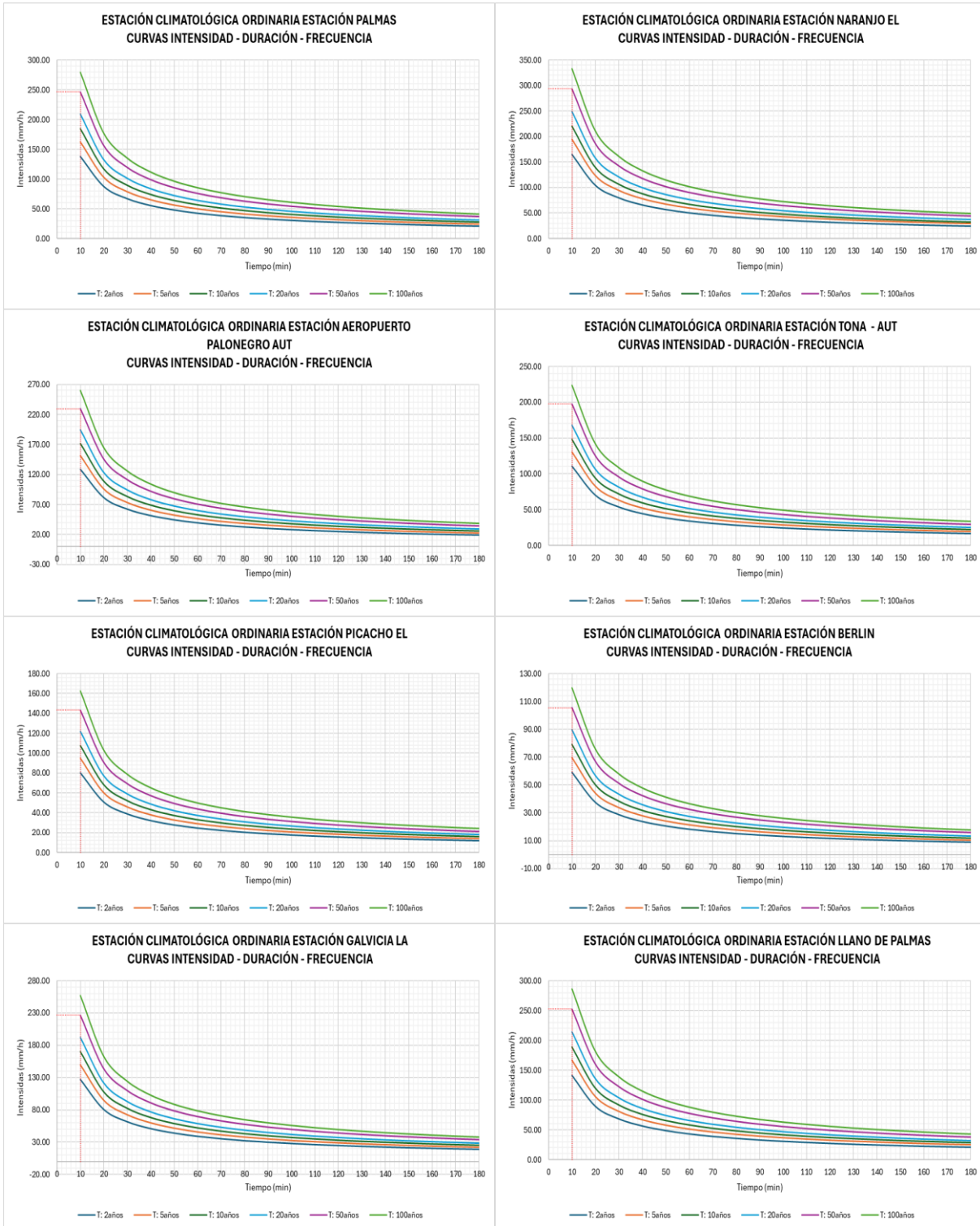
- Villar, L. M., & Vega Serrano, D. C. (2014). *Estudio del impacto que tienen los diferentes programas de mitigación del riesgo enfocados en la subdirección de gestión ambiental urbana sostenible de la cdmb para la comuna 14 de la ciudad de Bucaramanga*. <https://tinyurl.com/y2e7uupn>
- Wang, X., & Xie, H. (2018). A review on applications of remote sensing and geographic information systems (GIS) in water resources and flood risk management. In *Water (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 5). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/w10050608>
- Yin, J., Gao, Y., Chen, R., Yu, D., & Wilby, R. (2023). Flash floods: why are more of them devastating the world's driest regions? *Nature*, *615*, 212–215. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/d41586-023-00626-9>
- Zhu, Z., Chen, Z., Chen, X., & Yu, G. (2019). An assessment of the hydrologic effectiveness of low impact development (LID) practices for managing runoff with different objectives. *Journal of Environmental Management*, *231*, 504–514. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.046>

16. ANEXOS.

- Gráficos de las curvas de intensidad, duración y frecuencia para las estaciones de lluvia.

Figura 29
Curvas IDF - estaciones.





Fuente: Propia.

- Relación entre sistemas SUDS y variables HRU.

Tabla 23

Relación sistemas SUDS y variables HRU.

No	TIPO DE SUDS	GENERALIDADES	USO DE SUELOS	PENDIENTE	ÍNDICE DE HUMEDAD TOPOGRAFICA
1	Techos verdes	Variables relevantes: uso de suelos y pendiente.	Uso del Suelo (Crítico): Se basa en las condiciones o características de las superficies, especialmente si se trata de zonas urbanas en donde la impermeabilidad es alta	Pendiente (Crítico): dependiendo el grado de inclinación permite instalar sistemas ligeros o pesados y a la vez la acumulación del agua.	Índice de Humedad Topográfica (No Relevante): este sistema se instala en superficies impermeables donde no hay infiltración.
2	Fachadas verdes	Variables relevantes: uso de suelos y pendiente.	Uso del Suelo (Crítico): Son instalados en sitios donde la densidad es alta en zonas urbanas tratando de mitigar y controlar la escorrentía.	Pendiente (Crítico): en este sistema es fundamental esta variable ya que depende la elección del tipo de vegetación a implementar.	Índice de Humedad Topográfica (No Relevante): Las fachadas se instalan sobre superficies duras en donde el suelo no está presente.
3	Tanques de almacenamiento	Variables relevantes: uso de suelos y pendiente.	Uso del Suelo (Crítico): Para calcular el dimensionamiento del tanque se requiere del volumen de agua que depende directamente de la escorrentía por medio de la superficie, en donde las zonas con mayor impermeabilidad generaran mayores volúmenes.	Pendiente (Crítico): Su análisis está basado en la velocidad del flujo libre que tiene el agua a causa de los desniveles del suelo, para pendientes altas el caudal será mayor en cortos tiempos.	Índice de Humedad Topográfica (Menos Relevante): Este sistema se basa en la retención del agua, por lo tanto, la infiltración no es inmediata.
4	Alcorques inundables	Variables relevantes: uso de suelos y pendiente, pero el índice tiene una función secundaria.	Uso del Suelo (Crítico): Es fundamental en zonas urbanas con entorno impermeables donde el volumen de agua de escorrentía generado determina el funcionamiento del sistema.	Pendiente (Crítico): Para estos sistemas es necesario que el agua fluya adecuadamente hacia en sistema mediante la pendiente para que haya una captación optima.	Índice de Humedad Topográfica (Secundario): el sistema al estar compuesto de materiales naturales externos al propio material del suelo donde se ubicará, esta variable presenta una relevancia baja.
5	Humedales	Variables relevantes: tiene en cuenta las tres variables, pero de más importancia el índice.	Uso del Suelo (Crítico): Variable relevante para determinar el volumen de agua que llegará al sistema y depende del sitio en donde se ubicará.	Pendiente (Crítico): esta variable establece el tiempo que el agua permanece dentro del sistema.	Índice de Humedad Topográfica (El más crítico): factor fundamental para el sistema ya que aprovecha la capacidad del terreno en donde acumulará el agua.
6	Cunetas verdes	Variables relevantes: uso de suelos y pendiente.	Uso del Suelo (Crítico): Mediante esta variable se determina el volumen de agua que circulará por la cuneta.	Pendiente (Crítico): dentro del funcionamiento hidráulico la pendiente es de vital importancia para el transporte de agua y que en este sistema dirige hacia zonas verdes donde se realice el proceso de infiltración.	Índice de Humedad Topográfica (Menos Relevante): Este sistema para realizar el funcionamiento se basa en propiedades del sustrato y vegetación.
7	Cuencas secas	Variables relevantes: uso de suelos y pendiente.	Uso del Suelo (Crítico): Mediante esta variable se determina el volumen de agua que almacena ya que están destinadas a la captación de aguas es escorrentía de zonas extensas.	Pendiente (Crítico): para poder captar la mayor cantidad de agua requiere que la entrada mantenga pendientes considerables resultantes en altos caudales.	Índice de Humedad Topográfica (Menos Relevante): Este sistema se enfoca en la detección del agua más no la infiltración en donde se aproveche la humedad del suelo, por lo tanto, no es una variable relevante.
8	Zonas inundables	La variable más importante es el índice seguido del uso del suelo y la pendiente no presenta alta relevancia.	Uso del Suelo (Crítico): Este sistema destinado a la gestión de altos volúmenes de agua provenientes de áreas extensas con grandes superficies impermeables.	Pendiente (Crítico): esta variable para el funcionamiento del sistema requiere tener un bajo desnivel en donde almacene el agua en un periodo de tiempo considerable.	Índice de Humedad Topográfica (El más crítico): La ubicación de este sistema requiere puntos estratégicos basados en la acumulación del agua posteriormente a un evento de lluvia.

No	TIPO DE SUDS	GENERALIDADES	USO DE SUELOS	PENDIENTE	ÍNDICE DE HUMEDAD TOPOGRAFICA
9	Zanjas de infiltración	La variable de mayor importancia radica en la pendiente, seguida del índice y por último el uso de suelos.	Uso del Suelo (Importante): Es la variable de determinar la cantidad de agua fluirá en la zanja de infiltración en donde, además, es importante tener en cuenta el empleo de filtros debido al tipo contaminantes asociados al agua.	Pendiente (La más crítica): Es la variable con mayor relevancia en el funcionamiento hidráulico junto con el tiempo que da para que el agua logre infiltrarse, por lo tanto, es necesario conservar pendientes bajas.	Índice de Humedad Topográfica (Crítico): el objetivo principal de este sistema es la infiltración del agua en el suelo, por lo tanto, esta variable es fundamental para la ubicación del sistema donde haya la posibilidad de aprovechar la absorción.
10	Tanques de infiltración	La variable de mayor importancia es el índice seguido por el uso de suelo y por último la pendiente.	Uso del Suelo (Crítico) 🏠: Es la variable que determina el volumen de escorrentía y con la que se establece el tamaño del sistema.	Pendiente (Crítico) ⚡: Es recomendable que esta variable sea lo más reducida posible para la acumulación de agua en donde luego se infiltre en suelo.	Índice de Humedad Topográfica (El más crítico) ⚡: Esta variable es fundamental para identificar las zonas de infiltración y así gestionar de manera eficiente estos procesos en los tanques.
11	Pavimentos permeables	La variable más relevante está asociada a la pendiente, seguida por el índice y luego el uso de suelos. Este sistema es óptimo cuando se logra una excelente infiltración.	Uso del Suelo (Importante) 🏠: Esta variable adicionalmente de ser la base para determinar el volumen de escorrentía es fundamental en el diseño de este sistema.	Pendiente (La más crítica) ⚡: Esta variable controla la velocidad del flujo del agua, en donde es necesario para el proceso de infiltración bajas pendientes generando acumulación.	Índice de Humedad Topográfica (Crítico) ⚡: Es la variable fundamental para detectar las zonas destinadas a la acumulación que luego se infiltraran del agua al interior del suelo.
12	Jardín microcuena	La variable más relevante está asociada a la pendiente, seguida por el índice y luego el uso de suelos.	Uso del Suelo (Importante) 🏠: Esta variable adicionalmente de ser la base para determinar el volumen de escorrentía y están propuestos para captar el agua de zonas pequeñas.	Pendiente (La más crítica) ⚡: Variable fundamental para la retención y acumulación del agua en donde luego se infiltrará en el suelo.	Índice de Humedad Topográfica (Crítico) ⚡: Es la variable fundamental para detectar las zonas destinadas a la acumulación que luego se infiltraran del agua al interior del suelo.
13	Jardín de lluvia	La variable más relevante está asociada a la pendiente, seguida por el índice y luego el uso de suelos.	Uso del Suelo (Importante) 🏠: Esta variable adicionalmente de ser la base para determinar el volumen de escorrentía y están propuestos para captar el agua de zonas pequeñas.	Pendiente (La más crítica) ⚡: Variable fundamental para la retención y acumulación del agua en donde luego se infiltrará en el suelo.	Índice de Humedad Topográfica (Crítico) ⚡: Es la variable fundamental para detectar las zonas destinadas a la acumulación que luego se infiltraran del agua al interior del suelo.
14	Pozos de infiltración	La variable de mayor importancia es el índice, pero el uso y la pendiente no tiene mayor relevancia.	Uso del Suelo (Importante) 🏠: Esta variable adicionalmente de ser la base para determinar el volumen de escorrentía que gestionará el pozo.	Pendiente (Importante) ⚡: Esta variable es la encargada de dirigir la escorrentía de manera segura y eficiente.	Índice de Humedad Topográfica (El más crítico) ⚡: Es la variable fundamental para detectar las zonas destinadas a la acumulación que luego se infiltraran del agua al interior del suelo.
15	Zanja - bordo	La variable más relevante está asociada a la pendiente, seguida por el índice y luego el uso de suelos.	Uso del Suelo (Importante) 🏠: Esta variable adicionalmente de ser la base para determinar el volumen de escorrentía, el tipo de vegetación influye directamente en el flujo.	Pendiente (La más crítica) ⚡: Esta variable se encarga de ralentizar y detener el flujo de escorrentía para prevenir efectos de erosión y así permitir el proceso de infiltración.	Índice de Humedad Topográfica (Crítico) ⚡: Es la variable fundamental para detectar las zonas destinadas a la acumulación que luego se infiltraran del agua al interior del suelo.
16	Filtros	Variables relevantes: uso de suelos.	Uso del Suelo (El más crítico) 🏠: Esta variable adicionalmente de ser la base para determinar el volumen de escorrentía, estos sistemas deben ser diseñados con elementos específicos.	Pendiente (Importante) ⚡: Regula el caudal que llega al sistema, por lo tanto, es necesario adoptar pendientes que dirijan el agua de manera controlada evitando erosiones y sobrecargas.	Índice de Humedad Topográfica (Menos relevante) ⚡: Estos sistemas tienen como objetivo circular el agua hasta descargarla en un sitio objetivo, por lo tanto, no se basan en procesos de infiltración.

Fuente: Procesado mediante IA - Google Gemini.